

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Dominik Bačić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Smiljko Rudan, dipl. ing.

Student:

Dominik Bačić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru profesoru Smiljku Rudanu i kolegi Tomislavu Prosinečkom na strpljenju i pruženoj pomoći oko izrade ovog rada. Također, želio bih se zahvaliti svojim roditeljima Ivanu i Sanji, bratu Alanu i djevojci Josipi na velikoj podršci u toku dosadašnjeg studiranja. Bez njih završetak ne bi bio moguć.

Dominik Bačić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Dominik Bačić**

Mat. br.: 0035191967

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA SPOJA ČELIČNIH I KOMPOZITNIH DIJELOVA BRODSKE KONSTRUKCIJE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ANALYSIS OF STEEL AND COMPOSITE SHIP STRUCTURAL JOINTS**

Opis zadatka:

Zadatak završnog rada jest razmotriti mogućnost primjene kompozita u brodograđevnoj industriji s naglaskom na spojeve dijelova konstrukcije od kompozita i čelika te razmotriti načine analize takvih spojeva.

U okviru završnog rada potrebno je najprije pregledati dostupnu literaturu o spojevima čeličnih i kompozitnih dijelova brodske konstrukcije, odnosno o tzv. hibridnim spojevima, te praktičnim aspektima njihove primjene.

Na osnovi uvida u postojeće izvedbe potrebno je zatim definirati tipičan hibridni spoj, odnosno: njegove dijelove, način međusobnog povezivanja tih dijelova, način pričvršćenja kompozitnog dijela za klasičnu čeličnu konstrukciju te svojstva odabranih materijala. S obzirom na inherentnu složenost hibridnog spoja, ovaj dio zadatka treba obaviti uz razumna pojednostavljenja.

U drugom dijelu zadataka potrebno je modelirati odabrani hibridni spoj u odgovarajućem softverskom paketu te iznijeti zapažanja o mogućnostima i ograničenjima u izradi modela, naročito spojeva, te definiranju svojstava materijala. Zatim je potrebno provesti jednostavnu statičku analizu za odabrano realistično opterećenje hibridnog spoja, odnosno konstrukcije.

Konačno, potrebno je usporediti izvedu klasičnog čeličnog spoja i hibridnog spoja kroz saznanja stečena tijekom izrade završnog rada.

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.

3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.

3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Smiljko Rudan

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Nastia Degiuli

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	IV
SAŽETAK .....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD .....	1
1.1 Primjena kompozita u brodogradnji .....	1
1.2 Općenito o kompozitima .....	2
2. HIBRIDNI SPOJEVI .....	3
2.1 Karakteristike .....	3
2.2 Dosadašnja razmatranja i analize .....	4
3. RAZMATRANA KONSTRUKCIJA .....	5
3.1 Materijali .....	6
3.2 Izvedbe spoja (Modeli) .....	7
4. FEM ANALIZA .....	12
4.1 Proces modeliranja .....	12
4.2 Opterećenja i rubni uvjeti .....	16
4.3 Rezultati linearno statičke analize .....	20
4.4 Usporedba rezultata linearno statičke analize .....	35
5. ZAKLJUČAK .....	38
LITERATURA .....	39
PRILOZI .....	40

**POPIS SLIKA**

SLIKA 1.	JAHTA OD KOMPOZITA .....	1
SLIKA 2.	STABILIZACIJSKO HIDRODINAMIČKO KRILO OD KOMPOZITA.....	2
SLIKA 3.	KONVENCIONALNA BRODSKA KONSTRUKCIJA (LIJEVO) I HIBRIDNA BRODSKA KONSTRUKCIJA (DESNO).....	4
SLIKA 4.	SMJEŠTAJ VOZILA NA PLATFORMU (7).....	5
SLIKA 5.	POPREČNE I UZDUŽNE DIMENZIJE IZ (7) .....	5
SLIKA 6.	MODEL 1.....	8
SLIKA 7.	MODEL 2.....	9
SLIKA 8.	MODEL 3.....	10
SLIKA 9.	MODEL 4.....	11
SLIKA 10.	GEOMETRIJA POPREČNOG PRESJEKA KONSTRUKCIJE.....	12
SLIKA 11.	MREŽA KONAČNIH ELEMENATA POPREČNOG PRESJEKA KONSTRUKCIJE.....	12
SLIKA 12.	KONSTRUKCIJA U MREŽI 3D KONAČNIH ELEMENATA .....	13
SLIKA 13.	POVRŠINA S RUPAMA.....	13
SLIKA 14.	MREŽA KONAČNIH ELEMENATA U BLIZINI RUPE .....	14
SLIKA 15.	ODABIR ČVOROVA KRUTIH (SPIDER) ELEMENATA .....	14
SLIKA 16.	SPOJ KRUTIH ELEMENATA I 1D ŠTAPNOG ELEMENTA (IZDVOJENO) .....	15
SLIKA 17.	SPOJ KRUTIH ELEMENATA I 1D ŠTAPNOG ELEMENTA S OSTATKOM KONSTRUKCIJE .....	15
SLIKA 18.	ZONA LINEARNOG KONTAKTA NA GORNJEM LAMINATU .....	16
SLIKA 19.	RUBNI UVJETI KONSTRUKCIJE.....	17
SLIKA 20.	LC SLUČAJ OPTEREĆENJA.....	17
SLIKA 21.	PROPISANE DIMENZIJE KOTAČA OSOBNOG AUTOMOBILA .....	18
SLIKA 22.	NARINUTI TLAKOVI.....	18
SLIKA 23.	LINIJE SLOBODNIH RUBOVA MODELA .....	19
SLIKA 24.	MODEL 1.....	21
SLIKA 25.	MODEL 1- TLAČNA NAPREZANJA U PJENI (SPV), $\Sigma_{MAX}=64.673 \text{ N/MM}^2$ .....	22
SLIKA 26.	MODEL 1- DEFORMACIJA PJENE (SPV), $\Delta_{MAX}=16.72 \text{ MM}$ .....	22
SLIKA 27.	MODEL 1- SMIČNA NAPREZANJA U GORNJEM LAMINATU (LC), $\Sigma_{MAX}=432.6 \text{ N/MM}^2$ ....	23
SLIKA 28.	MODEL 2.....	24
SLIKA 29.	MODEL 2- TLAČNA NAPREZANJA U ALUMINIJU (LC), $\Sigma_{MAX}=-121.67 \text{ N/MM}^2$ .....	25
SLIKA 30.	MODEL 2- KONTURA DEFORMACIJA ZA LC SLUČAJ OPTEREĆENJA, $\Delta_{MAX}=2.89 \text{ MM}$ ..	26
SLIKA 31.	MODEL 2- KONTURA DEFORMACIJA ZA SPV SLUČAJ OPTEREĆENJA, $\Delta_{MAX}=0.23 \text{ MM}$ .	26
SLIKA 32.	MODEL 3.....	27
SLIKA 33.	MODEL 3- TLAČNA NAPREZANJA U ALUMINIJU (LC), $\Sigma_{MAX}=-134.83 \text{ N/MM}^2$ .....	28
SLIKA 34.	MODEL 3- SMIČNA NAPREZANJA U GORNJEM LAMINATU (LC), $\Sigma_{MAX}=50.708 \text{ N/MM}^2$ ..	29

SLIKA 35. MODEL 3- KONTURA DEFORMACIJA ZA LC SLUČAJ OPTEREĆENJA, $\Delta_{MAX}=3.72$ MM	30
SLIKA 36. MODEL 3- KONTURA DEFORMACIJA ZA SPV SLUČAJ OPTEREĆENJA, $\Delta_{MAX}=0.116$ MM	30
SLIKA 37. MODEL 4.....	31
SLIKA 38. MODEL 4- SMIČNA NAPREZANJA U GORNJEM LAMINATU (LC), $\Sigma_{MAX}=70.845$ N/MM <sup>2</sup> ..	32
SLIKA 39. MODEL 4- SMIČNA NAPREZANJA U DONJEM LAMINATU (LC), $\Sigma_{MAX}=70.845$ N/MM <sup>2</sup> .....	33
SLIKA 40. MODEL 4- KONTURA DEFORMACIJA ZA LC SLUČAJ OPTEREĆENJA, $\Delta_{MAX}=3.967$ MM .....	34
SLIKA 41. MODEL 4- KONTURA DEFORMACIJA ZA SPV SLUČAJ OPTEREĆENJA, $\Delta_{MAX}=0.0589$ MM.....	34

**POPIS TABLICA**

TABLICA 1. MEHANIČKA SVOJSTVA MATERIJALA .....	7
TABLICA 2. EKSTRAPOLIRANE VRIJEDNOSTI VON MISES [N/MM <sup>2</sup> ] NAPREZANJA I VRIJEDNOSTI MAKSIMALNIH POMAKA [MM] ZA MODEL 1 .....	21
TABLICA 3. EKSTRAPOLIRANE VRIJEDNOSTI VON MISES NAPREZANJA [N/MM <sup>2</sup> ] I VRIJEDNOSTI MAKSIMALNIH POMAKA [MM] ZA MODEL 2 .....	24
TABLICA 4. EKSTRAPOLIRANE VRIJEDNOSTI VON MISES [N/MM <sup>2</sup> ] NAPREZANJA I VRIJEDNOSTI MAKSIMALNIH POMAKA [MM] ZA MODEL 3 .....	28
TABLICA 5. EKSTRAPOLIRANE VRIJEDNOSTI VON MISES NAPREZANJA [N/MM <sup>2</sup> ] I VRIJEDNOSTI MAKSIMALNIH POMAKA [MM] ZA MODEL 4 .....	31
TABLICA 6. VRIJEDNOSTI EKSTRAPOLIRANIH VON MISES NAPREZANJA [N/MM <sup>2</sup> ] I MAKSIMALNIH POMAKA [MM] ZA MODEL 1 I MODEL 2 .....	35
TABLICA 7. VRIJEDNOSTI EKSTRAPOLIRANIH VON MISES NAPREZANJA [N/MM <sup>2</sup> ] I MAKSIMALNIH POMAKA [MM] ZA MODEL 2 I MODEL 3 .....	35
TABLICA 8. VRIJEDNOSTI EKSTRAPOLIRANIH VON MISES NAPREZANJA [N/MM <sup>2</sup> ] I MAKSIMALNIH POMAKA [MM] ZA MODEL 3 I MODEL 4 .....	36
TABLICA 9. USPOREDBA REZULTATA SVIH MODELA ZA OBA SLUČAJA OPTEREĆENJA .....	37



## SAŽETAK

Hibridni spojevi, odnosno mjesta spojeva konstrukcije izvedenih od različitih materijala, u posljednjih nekoliko godina postaju sve zanimljiviji za inženjere. Svoju najveću primjenu nalaze u zrakoplovnoj, automobilskoj i pomorskoj industriji. Najveći razlog te primjene je manja težina u odnosu na uobičajene homogene metalne spojeve zbog čega su jako zanimljivi i brodograđevnoj industriji. Nadalje, u nekim slučajevima su se pokazali veoma praktičnim u smislu zamjene određenog dijela konstrukcije od kompozita. Međutim, zbog izloženosti različitim agresivnim stanjima okoline (kao što su visoka koncentracija soli, velika vlažnost, izloženost UV zračenju...), različitim statičkim i dinamičkim opterećenjima, redovito smanjene otpornosti na požar i dr. njihova primjena u brodogradnji predstavlja velik izazov budući da materijali korišteni u gradnji broda moraju zadržavati svoja svojstva u takvim uvjetima.

Dva načina povezivanja najčešće korištena kod hibridnih spojeva su: mehanički i adhezivno, od kojih svaki ima širok spektar mogućnosti i primjene. U ovom radu se pomoću konačnih elemenata napravio model sendvič konstrukcije sa strane povezane s I profilima pomoću čelične pločice i vijaka. Jezgru konstrukcije čini PVC pjena, a s gornje i donje strane su povezana staklena vlakna. Promatralo se na koji način se mijenja ponašanje konstrukcije i stanje u materijalima kad se promijene određeni detalji u izvedbi spoja. Provela se linearno statička analiza, te su u fokus stavljeni rezultati kod materijala u spoju.

Ključne riječi: sendvič konstrukcija, čelični I profil, vijak, konačni elementi, linearno statička analiza

## **SUMMARY**

Hybrid joints, i.e. places of structural connection made of different materials, in past few years are getting more and more interesting for engineers. They find their biggest application in aeroplane, automobile and marine industry. The biggest reason for their application is smaller weight in comparison to usual homogeneous metal joints, and that is why they are also interesting to shipbuilding industry. Furthermore, in some cases they were shown very practical in sense of replacement of some particular structural part made of composite. However, because of the exposure to all kinds of aggressive environment (big concentration of salt, humidity, UV radiation etc.), different types of static and dynamic loads, lower resistance to fire etc. their application in shipbuilding industry presents a big challenge since the materials used in the industry should refrain its characteristics in those environments.

There are usually two types of hybrid connections: mechanical and adhesive and both of those types have wide range of possibilities and applications. In this paper, finite element model of sandwich panel has been made, connected on the sides to steel I profile using bolts and steel plate. Core of the composite is made of PVC foam which is glued with the glass fibers on top and the bottom. Linear static analysis for FE model was conducted to study how the change in certain details in the joint will have affect on the behaviour of the overall structure. In the results, focus was put on the materials in the joint.

Key words: Finite element modeling, sandwich panel, steel I profile, bolt, linear static analysis

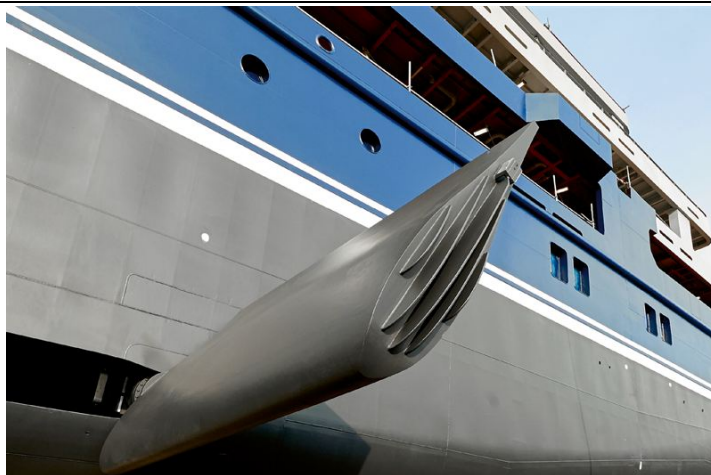
## 1. UVOD

### 1.1 Primjena kompozita u brodogradnji

Naziv „hibridni spoj“ podrazumijeva da su dijelovi koji čine neku konstrukciju od različitih materijala. Najčešće je to spoj metala (npr. čelik, aluminij, željezo...) i kompozita. Razlog zbog kojeg se oni sve više promatraju je taj što postoji mogućnost izrade lakše i manje korozivne konstrukcije pogotovo u kombinaciji sa nehrđajućim čelikom ili aluminijem, a što je posebno pogodno za brodogradnju. Zbog toga što kompozitima i dalje nedostaje krutost i čvrstoća da bi mogli adekvatno izdržati opterećenja koja trpi primarna brodska konstrukcija, njihova je primjena u izradi glavnih konstrukcijskih elemenata broda i dalje u fazi razmatranja i testiranja. Zbog toga se kompoziti u velikoj brodogradnji zasad koriste više kao oprema ili kao dio nosive konstrukcije (npr. pregrada, paluba, propeler, podvodno hidro dinamičko tijelo...) dok se u maloj brodogradnji njihova primjena može naći i kao materijal cjelokupnog trupa (slika 1). Budući da su današnji veliki trgovački brodovi uglavnom napravljeni od čelika, neophodno je u velikoj mjeri ispitati i testirati implementaciju kompozita u konvencionalnu čeličnu konstrukciju. Neke od prednosti uvođenja kompozita u brodsku konstrukciju su: 1) mogućnost izrade kompleksnih hidro dinamičkih formi trupa (slika 2); 2) smanjenje ukupne težine sistema što posljedično brodove čini bržima i efikasnijima; 3) lakše održavanje upotrebom uklonjivih panela (1).



Slika 1. Jahta od kompozita



**Slika 2. Stabilizacijsko hidrodinamičko krilo od kompozita**

## **1.2 Općenito o kompozitima**

Kompozit nastaje kombiniranjem dvaju različitih materijala različitih svojstava čime se dobiva novi materijal s karakteristikama različitim od karakteristika pojedinačnih sastavnih materijala. Rezultat su najčešće bolja mehanička svojstva, manja masa i jeftinija izvedba u odnosu na tradicionalne materijale. Osnova običnog kompozita su matrica i ojačala. Matrica, koju čini materijal sa ne pretjerano dobrim mehaničkim svojstvima, okružuje i povezuje grupirana vlakna čime osigurava njihovu relativnu nepomičnost i ravnomjernu distribuciju naprezanja. S druge strane, vlakna svojim dobrim mehaničkim svojstvima pružaju matrici sigurnost od oštećenja. Postoji široka paleta za odabir matrice i ojačala pa je tako moguć bezbroj kombinacija kojima se dobivaju kompozitni materijali. Kompoziti se, osim što se mogu proizvoditi, mogu naći i u prirodi i kao takvi nalaze svoju primjenu. Najčešći primjer je drvo kojeg čine duga vlakna od celuloze koje na okupu drži puno slabija materija koja se zove lignin, a kao što znamo drvo je i dan danas jedan od materijala od kojih se grade brodovi. Za ojačanje matrice mogu se koristiti staklena ili ugljična vlakna, celuloza i polimeri. U zadnje vrijeme se razvojem nano-tehnologije razvijaju i vlakna od boron-nitrida koji u odnosu na ugljična vlakna imaju otprilike jednaku čvrstoću, ali veću otpornost pri visokim temperaturama i svojstvo piezo-električnosti. Vlakna općenito moraju osiguravati veću krutost kompozita, međutim također veoma bitna im je uloga u sprječavanju širenja pukotine koja bi se kod same matrice pojavljivala puno prije i puno lakše. Matrica može biti od: polimera, poliesterske smole, vinilesterske smole, epoksi smole, SMP smola (Shape Memory Polymer)...i odabire se s obzirom na uvjete kojima će biti izložena.

Međutim, postoji i jedna vrsta kompozita koji nisu dobiveni kombinacijom matrice i ojačala već povezivanjem dva višestruka kruta sloja materijala za laganu jezgru. To su tzv. sendvič kompoziti i oni spadaju u posebnu vrstu kompozita. Jezgru čini materijal male čvrstoće, ali zbog svoje veće debljine ovoj vrsti kompozita pruža veću krutost na savijanje s relativno malom masom. S obzirom na tip i način na koji podupire slojeve vlakana, jezgra se može podijeliti na slijedeće skupine: pjene, tekstilne i krovišne jezgre, korugirane jezgre i saće jezgre. Lice kompozita sačinjavaju najčešće slojevi od staklenih ili ugljičnih vlakana ili termoset polimera i sa jezgrom su povezani s gornje i donje strane adhezivno.

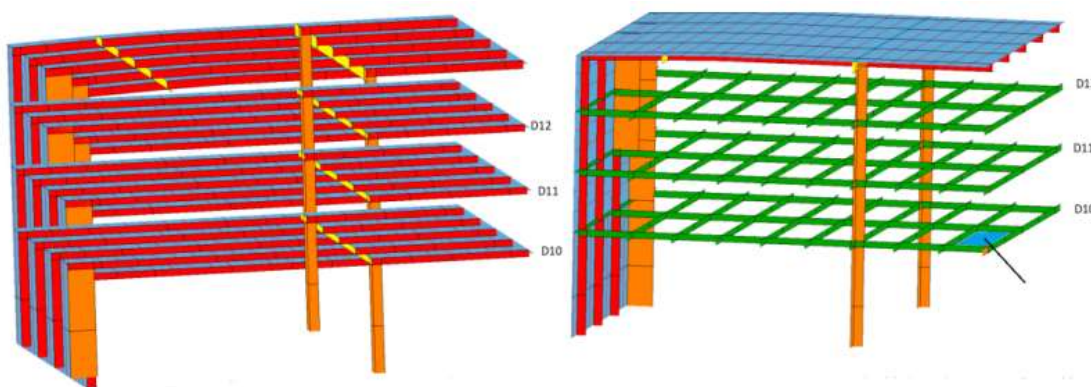
## **2. HIBRIDNI SPOJEVI**

### **2.1 Karakteristike**

Kod mehaničkog hibridnog spoja postoje dva ključna problema. Prvo je priprema kompozita, koja uglavnom podrazumijeva strojnu obradu i bušenje što može rezultirati oštećenjem materijala. Drugo je koncentracija naprezanja na mjestima spoja gdje je moguća i deformacija rupe uslijed zamora. Oba faktora mogu doprinijeti preuranjenom popuštanju kompozita te naposljetku puknućem. S druge strane, adhezivno spajanje je uobičajena alternativa mehaničkom povezivanju te ima veću krutost pa prenosi većinu opterećenja. Međutim, veoma je osjetljivo na pripremu površine i dosta često iziskuje skupe obrade i procedure kontrole kvalitete. Između ostalog, može doći i do degradacije ljepila nakon nekog vremena, pogotovo u vrućoj i vlažnoj okolini, a kada dolazi do popuštanja i pucanja, onda se to događa iznenada (2). U odnosu na adhezivno spajanje, mehaničko ima veći modul elastičnosti i modul smika zbog čega ne dolazi do iznenadnog loma u spoju, ali se javlja problem loše distribucije naprezanja. Stoga se preporuča svojevrsna kombinacija obje metode gdje bi adhezivan spoj doprinio boljoj distribuciji naprezanja dok bi mehanički spoj kompenzirao nedostatak dugoročne pouzdanosti ljepila te sačuvao strukturni integritet (3). Također, kod kombiniranog vijčanog i lijepljenog spoja, vijci mogu pomoći zaštititi ljepilo u slučaju požara i preuzeti cijelo opterećenje (4).

## 2.2 Dosadašnja razmatranja i analize

Kabche *et al.* (1) u svom radu opisuje MACH projekt (Modular Advanced Composite Hullform) koji za cilj ima razviti koncepte hibridnog spoja kompozit-metal. Fokus tog rada je stavljen na vijčani spoj hidro dinamičkog kompozitnog panela i metalnog okvira. Analiza spoja je provedena FEM modelom te se ustanovilo da je takav pristup adekvatan za globalnu procjenu naprežanja u panelu. Međutim, mnogi znanstvenici svoje rezultate dobivene FEM analizom uspoređuju s eksperimentom. Tako na primjer Boyd *et al.* (5) dobiva dobro poklapanje rezultata proračuna i eksperimentalne analize gdje se pomoću Weibull-ove kumulativne distribucije predviđao zamor kompozita. Uz to, dobra poklapanja su dobivena i kod numeričke i eksperimentalne analize gdje se gledala pojava pukotine u linearnom području materijala. Wen Li *et al.* (6) se bavio optimizacijom spoja kompozit-čelik te je dokazao kako je moguće dobiti lakši i čvršći hibridni spoj mijenjanjem detalja u dizajnu spoja. Andrić *et al.* (7) se u projektu Uljanik brodogradilišta bavi implementacijom kompozitnih platformi u postojeću brodsku čeličnu konstrukciju gdje uspoređuje globalni odziv konvencionalnog strukturnog koncepta sa novim, hibridnim konceptom.



**Slika 3. Konvencionalna brodska konstrukcija (lijevo) i hibridna brodska konstrukcija (desno)**

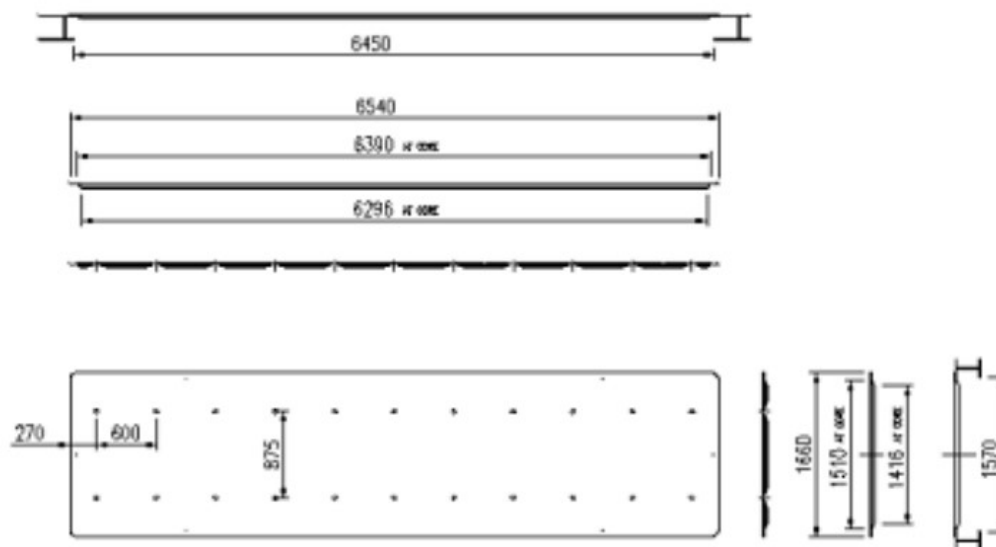
Ovo su samo neki od primjera bavljenja problemom hibridnih spojeva. Kao što je već rečeno, ova tema je i dalje u razvojnoj fazi i sve joj se više pažnje posvećuje. Spomenuti radovi predstavljaju dosadašnji doseg znanosti u području hibridnih spojeva i konstrukcija.

### 3. RAZMATRANA KONSTRUKCIJA

Dimenzije i izvedba konstrukcije u ovom radu su uzete iz već postojećeg projekta Uljanik brodogradilišta na kojem su sudjelovali i profesori sa Katedre za brodogradnju i pomorsku tehniku. Projekt se sastojao u pronalaženju najlakše mogućeg i ekonomski isplativog strukturnog dizajna kompozitnih sendvič panela namijenjenih za smještaj automobila, kamiona i ostalih kotrljajućih tereta na inovativnom Ro-Ro brodu (7). U odnosu na taj projekt, radi jednostavnije izrade mreže konačnih elemenata, uzete su nešto drugačije dimenzije.



Slika 4. Smještaj vozila na platformu (7)



Slika 5. Poprečne i uzdužne dimenzije iz (7)

Platforma je u ovom radu dugačka 6 m i duž nje je postavljeno deset vijaka sa svake strane. Tokom modeliranja slijedećih izvedbi dolazilo je do promjena u širini platforme što je bilo neophodno da bi model spoja bio pouzdan. Sljedeće veličine su ostale nepromijenjene:

- Debljina I profila 200x90 :  $t_I = 8 \text{ mm}$
- Debljina čelične pločice :  $t_P = 6 \text{ mm}$
- Debljina kompozita :  $t_K = 46 \text{ mm}$
- Duljina platforme :  $L_P = 6000 \text{ mm}$
- Promjer provrta za vijke :  $D_P = 30 \text{ mm}$

U nastavku će biti opisani izabrani materijali konstrukcije te slike s opisima četiri različitih izvedbi hibridnog spoja.

### 3.1 Materijali

Platforma je napravljena od sendvič kompozita koji sa gornje i donje strane ima laminate od staklenih vlakana E600-VIN debljine 0.5 mm, a koje povezuje pjena od polivinil klorida (PVC) debljine 40 mm. Laminate sačinjava po šest slojeva staklenih vlakana čiji su smjerovi naizmjenično postavljeni pod kutovima od 0 i 45 stupnjeva u odnosu na uzdužnu os platforme. Kompozitna platforma povezana je vijčano s čeličnom konstrukcijom pomoću čelične pločice koja nasjeda na čvrsti I profil, međutim u toku rada napravile su se razne izvedbe spoja, neke u kombinaciji sa aluminijskom pločicom umetnutom između dva sloja laminata, a neke bez. Vijci su čelični, klase čvrstoće 10.9, a promjer struka im je 30 mm. Svojstva kompozita uzeta su iz softverskog paketa CompoSIDE, a svojstva čelika i aluminija iz FEMAP-a. Budući da su staklena vlakna općenito ortotropni materijali (različita svojstva u različitim smjerovima), za razliku od ostalih izotropnih materijala (ista svojstva u svim smjerovima), imaju po tri vrijednosti za svako mehaničko svojstvo, ali u ovom slučaju samo za dva, modul elastičnosti i Poissonov faktor. Tablica 1 prikazuje vrijednosti mehaničkih svojstava spomenutih materijala.



Tablica 1. Mehanička svojstva materijala

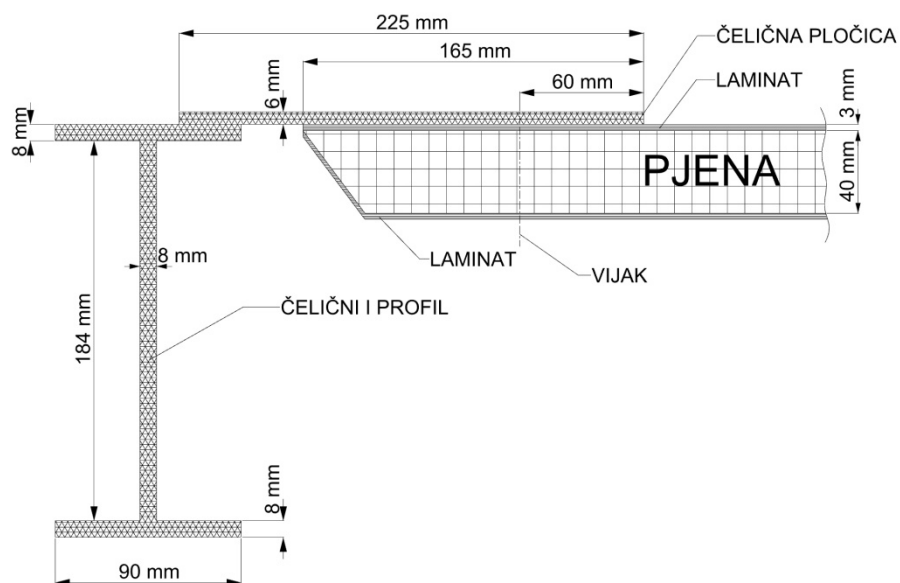
Materijal	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Modul elastičnosti [MPa]	Poissonov faktor	Vlačna čvrstoća [MPa]	Modul smika [MPa]
Stakleno vlakno (E600)	193	E <sub>1</sub> =24910 E <sub>2</sub> =24910 E <sub>3</sub> =10624	v <sub>12</sub> =0.15 v <sub>23</sub> =0.32 v <sub>13</sub> =0.32	373.7	3901.2
Pjena (PVC)	125	95	0.4	1.5	28
Čelik za I profil i ploču	7833	199948	0.29	310.3	0
Čelik za vijak	7833	199948	0.29	351	0
Aluminij	2796	73084	0.33	96.5	0

### 3.2 Izvedbe spoja (Modeli)

U radu su izrađene četiri izvedbe hibridnog spoja koje se razlikuju kako slijedi:

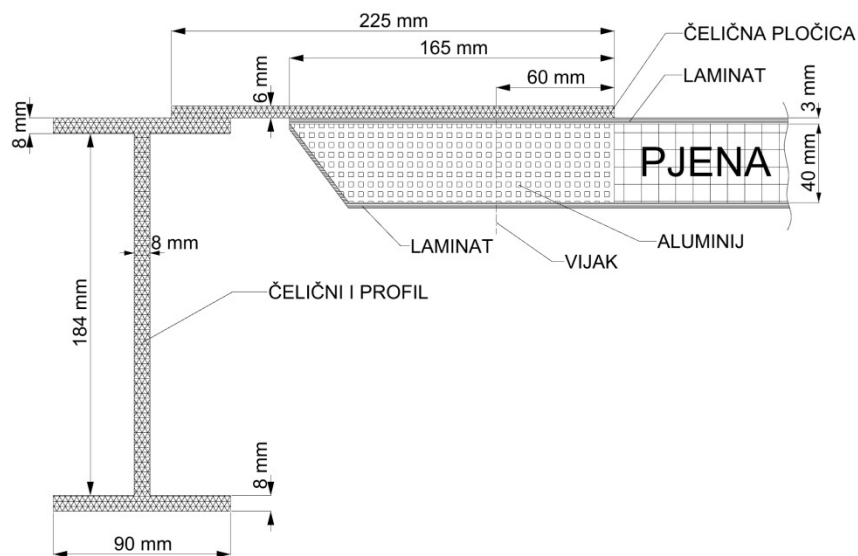
1. Model 1- Izvedba spoja kod koje vijak, osim što prolazi kroz čelik i laminate, prolazi kroz pjenu kompozita
2. Model 2- Izvedba spoja s aluminijskom pločicom umetnutom u sendvič kompozit. Vijak prolazi kroz čelik, laminate i aluminij.
3. Model 3- Izvedba spoja s aluminijskom pločicom umetnutom između dva laminata kompozita koji zajedno uvode proširenje platforme. Vijak prolazi kroz čelik, laminate i aluminij
4. Model 4- Izvedba spoja s proširenjem konstrukcije gdje vijak prolazi kroz čelik i dva sloja laminata kompozita

Slika 6 prikazuje prvu promatranu izvedbu hibridnog spoja (Model 1). Kompozit je povezan sa čeličnom pločicom vijčano, bez dodatnog materijala između njih. Vijak dakle prolazi kroz čeličnu pločicu i kompozit. Ukupna širina platforme u ovom slučaju iznosi 1500 mm od čega je slobodne širine 1170 mm. Na ovoj izvedbi se promatralo ponašanje pjene kompozita, kao materijala s najlošijim mehaničkim svojstvima u spoju.



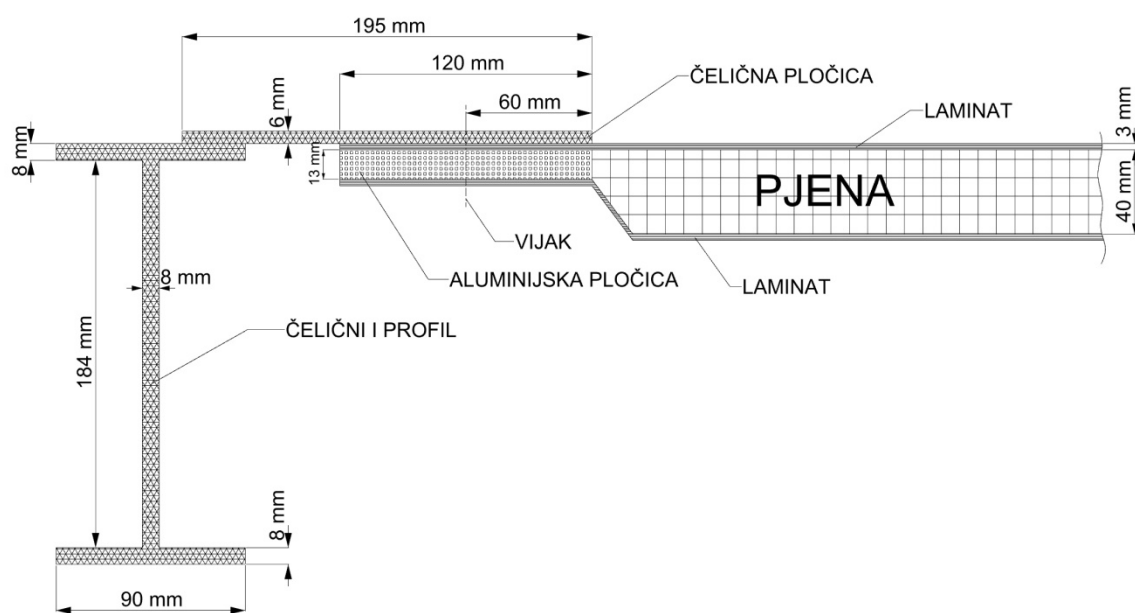
Slika 6. Model 1

Druga izvedba (Model 2) je po dimenzijama ista kao i prva. Razlikuju se samo po tome što je umetnuta aluminijska pločica kao integrirani dio kompozita (slika 7). Ovakav spoj je tvrdi i krući od prethodnog pošto su mehanička svojstva aluminija znatno bolja od pjene od PVC-a. u ovoj izvedbi se promatralo na koji način će se promijeniti deformacije i naprezanja u ostalim materijalima kad u spoju imamo tvrdi čvršći materijal.



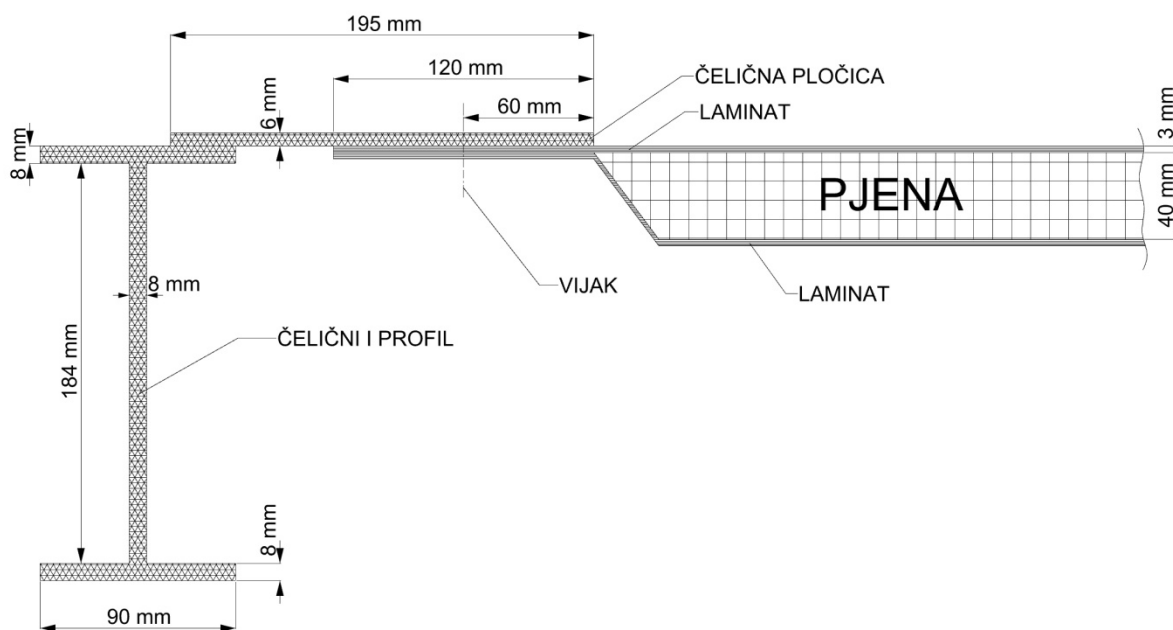
Slika 7. Model 2

U sljedećoj izvedbi (Model 3) došlo je do proširenja platforme jer je aluminijska pločica umetnuta kao dodatak kompozitu (slika 8). Ukupna širina platforme ovdje iznosi 1710 mm, a slobodna širina 1470 mm što je povećanje od 300 mm u odnosu na prijašnje dvije izvedbe. Vidimo i da je čelična pločica nešto uža nego u prethodnim slučajevima zbog čega se dodatno dobilo na prostoru. Također, platforma se nalazi 15 mm dalje od I profila. Na ovoj izvedbi se promatrao utjecaj broja provrta za vijke i mreže konačnih elemenata oko provrta za vijak na rezultate linearno statičke analize što će biti opisano u Prilogu 1.



Slika 8. Model 3

Posljednja promatrana izvedba (Model 4) nema umetnutu aluminijsku pločicu, ali ima proširenje platforme u svrhu izbjegavanja prolaska vijka kroz pjenu sendvič kompozita. Po dimenzijama je ista kao gore opisana izvedba. Na ovoj izvedbi se gledalo dali konstrukcija može izdržati spoj bez uvođenja dodatnog materijala kao mjere sigurnosti.



Slika 9. Model 4

## 4. FEM ANALIZA

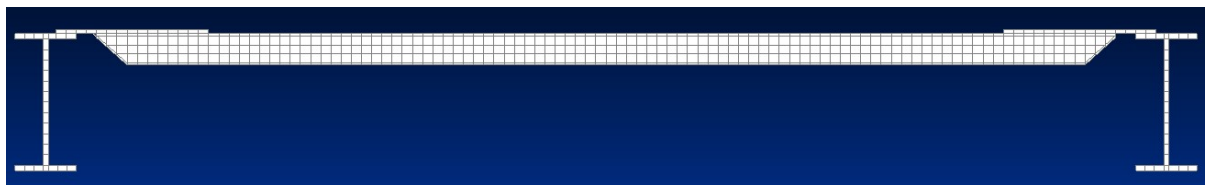
### 4.1 Proces modeliranja

Proces modeliranja započeo je izradom geometrije poprečnog presjeka konstrukcije u FEMAP softveru (slika 10). Konstrukcija je diskretizirana na površine koje su predstavljale pojedine dijelove konstrukcije od različitih materijala, u svrhu lakše izrade mreže konačnih elemenata i zadavanja svojstava.



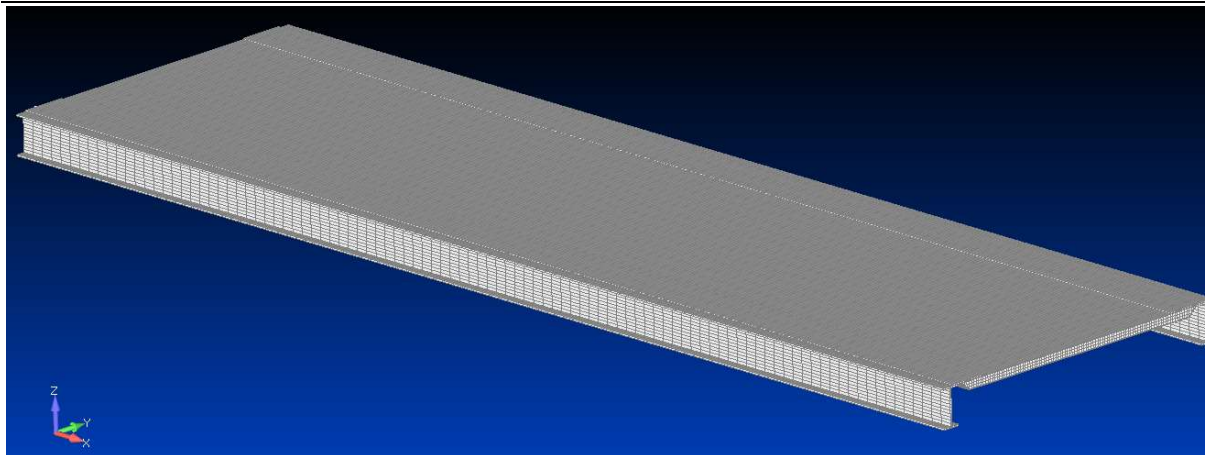
Slika 10. Geometrija poprečnog presjeka konstrukcije

Potom se napravila mreža konačnih elemenata (slika 11). Za čelične dijelove (I profil i pločica) i pjenu elementi su ravninski pločasti, a za laminate ravninski laminatni.



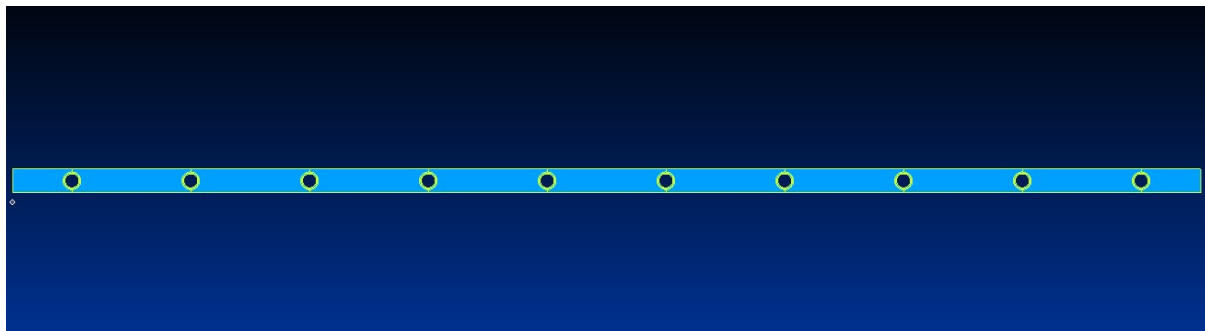
Slika 11. Mreža konačnih elemenata poprečnog presjeka konstrukcije

Sljedeći korak bio je ekstrudiranje tih 2D elemenata u uzdužnom smjeru čime su se oni pretvorili u volumne elemente te se tako dobila cijela konstrukcija u mreži 3D konačnih elemenata (slika 12). Ekstrudiranje je išlo do duljine od 6000 mm sa podjelom na 600 elemenata. Nakon toga bilo je potrebno izbrisati prijašnje 2D elemente radi izbjegavanja diskontinuiteta u mreži. U protivnom, analiza ne bi bila moguća.



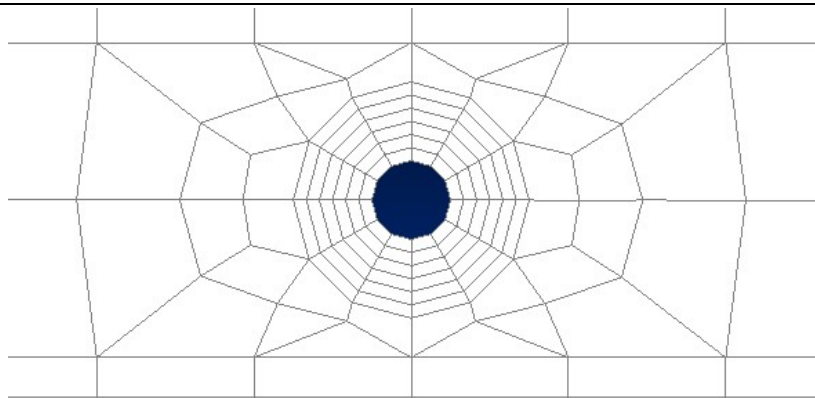
**Slika 12. Konstrukcija u mreži 3D konačnih elemenata**

Potom je bilo potrebno napraviti rupe za vijke. Napravljeno je deset rupa uzduž platforme. To je iziskivalo poseban proces izrade mreže konačnih elemenata u kojem se određeni dio konstrukcije morao izrezati te nanovo izraditi, ali ovaj put sa rupama. Postupak je bio više-manje isti kao gore opisani, s jedinom razlikom u smjeru ekstrudiranja koji je u ovom slučaju bio vertikalno prema dolje. Slika 13 prikazuje površinu na kojoj su se napravile rupe promjera 30 mm i na kojoj se zatim napravila mreža konačnih elemenata.



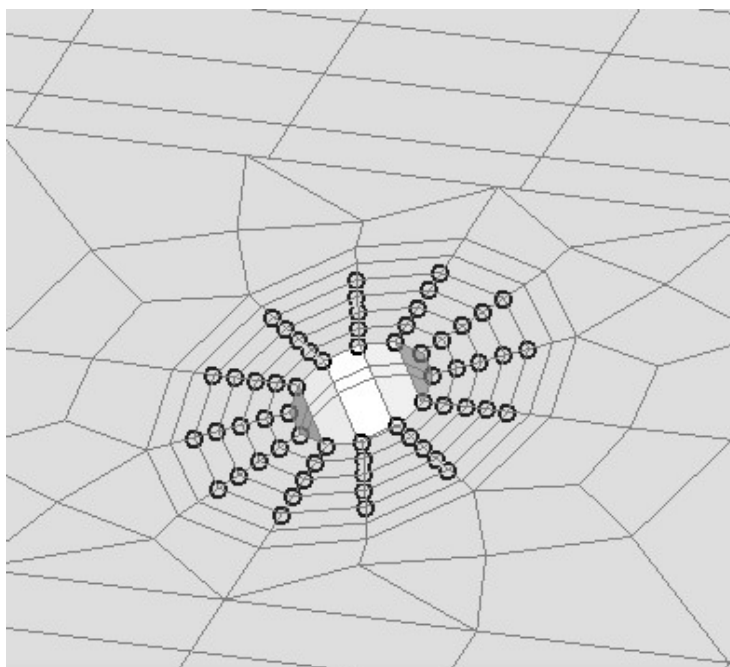
**Slika 13. Površina s rupama**

Nakon što se konstrukcija upotpunila, ostalo je još samo napraviti malo finiju mrežu k.e u blizini rupe pomoću alata *washer*.



**Slika 14. Mreža konačnih elemenata u blizini rupe**

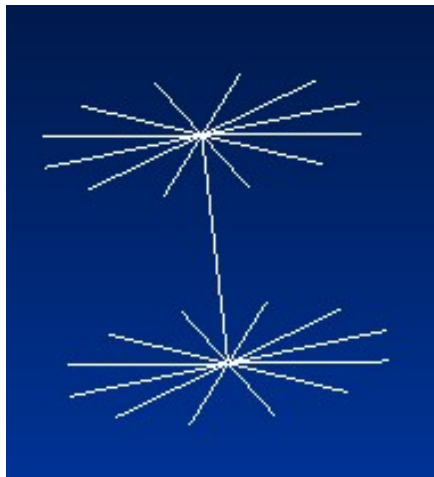
Budući da se u stvarnosti ovakav način povezivanja konstruktivnih elemenata radi pomoću vijaka s maticom i podloškama, bilo je potrebno odabrati najprikladniji način modeliranja takvog spoja. To je izvedeno tako da su vijci modelirani pomoću 1D štapnih elemenata koji prolaze kroz sredinu rupe, a s gornje i donje strane su povezani pomoću krutih elemenata (spider) koji simuliraju maticu i podlošku. Kruti elementi su se modelirali na način da su im se odabrali čvorovi na gornjoj strani čelične pločice i na donjoj strani donjeg laminata, na udaljenosti do 70 mm od rupe, koji su se potom povezali, čime se dobila čvrsta veza.



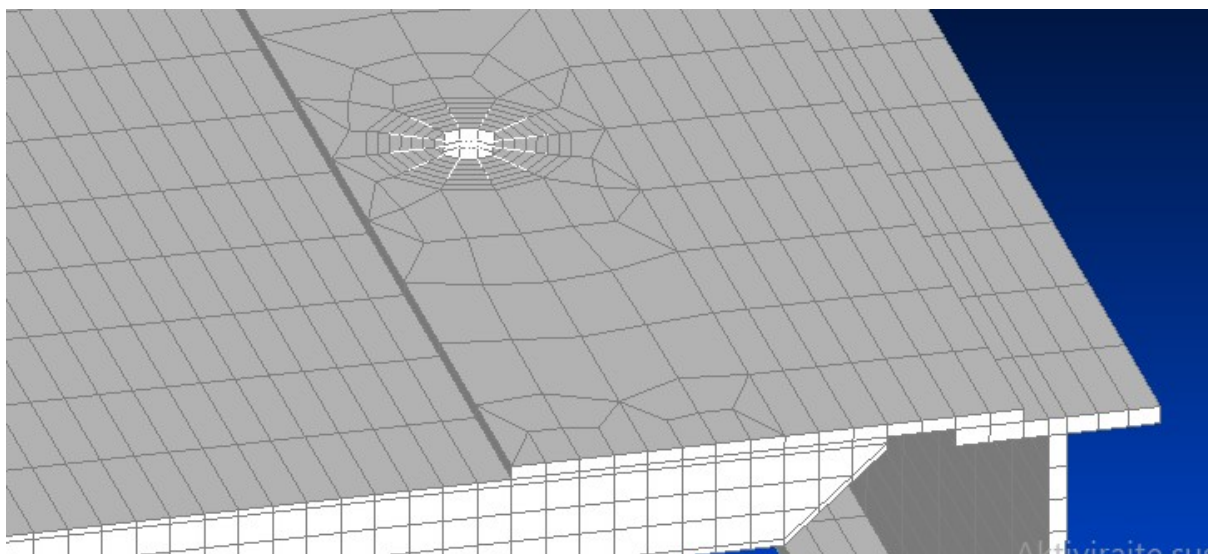
**Slika 15. Odabir čvorova krutih (spider) elemenata**



Zatim je 1D štapni element (koji predstavlja vijak, pa stoga ima isti promjer kao stvarni vijak) povezan u svojim čvorovima u središtima tih krutih elemenata (slika 16)



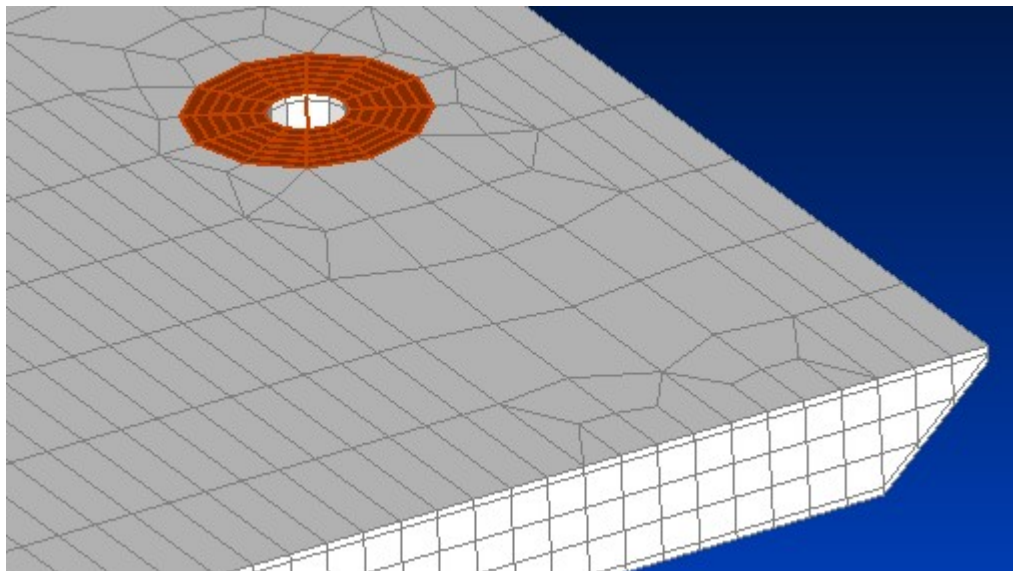
**Slika 16. Spoj krutih elemenata i 1D štapnog elementa (izdvojeno)**



**Slika 17. Spoj krutih elemenata i 1D štapnog elementa s ostatkom konstrukcije**

Zatim je na svaki vijak stavljena odgovarajuća sila prednaprezanja koja za vijak klase čvrstoće 10.9 i dimenzija M30 prema (8) iznosi 390 kN

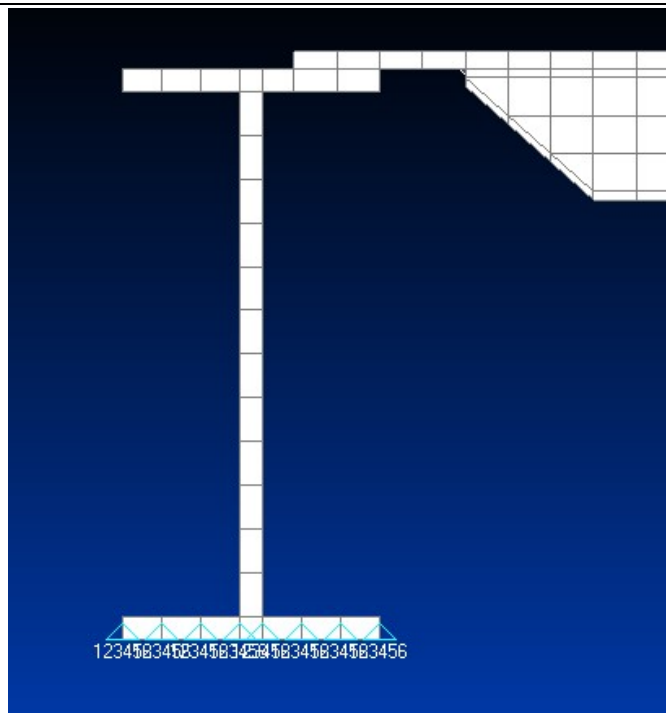
Da bi ovakav način modeliranja spoja funkcionirao, potrebno je još modelirati linearni kontakt između dijelova koji se spajaju, odnosno numerički lijepljeni spoj koji se u FEMAP-u napravio preko alata *Glue Connection*. Takav spoj je ovdje napravljen na mreži k.e. u blizini svake rupe, između čelične pločice i gornjeg laminata kompozita (slika 18).



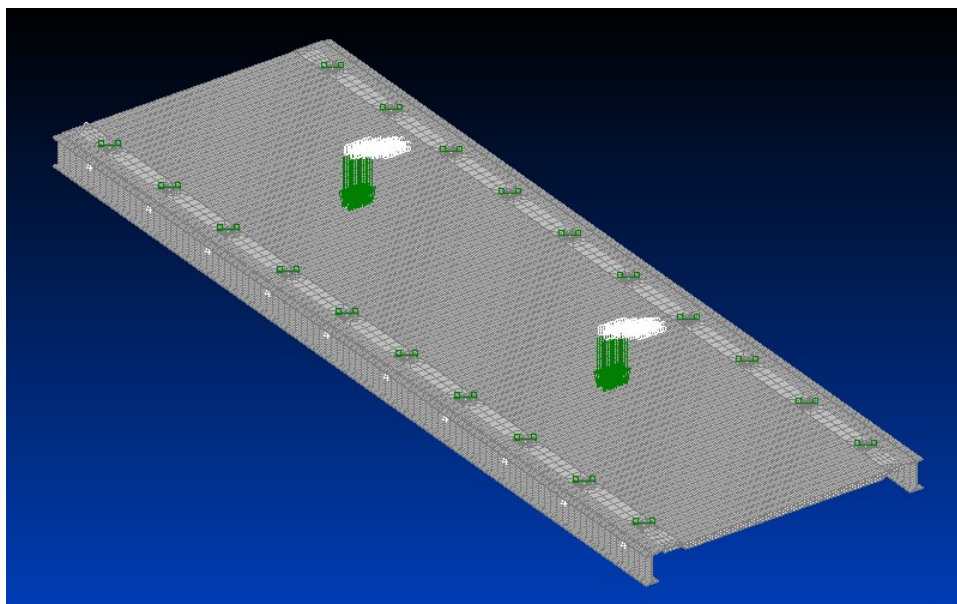
**Slika 18. Zona linearnog kontakta na gornjem laminatu**

## **4.2 Opterećenja i rubni uvjeti**

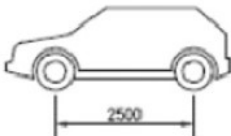
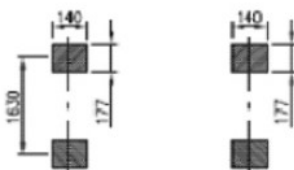
U modelu je zadan jedan rubni uvjet i to na najnižim čvorovima I profila kojima su spriječeni pomaci i rotacije u svim smjerovima (slika 19). Takav rubni uvjet je zadan iz razloga što u modelu I profili predstavljaju čvrstu i krutu konstrukciju s kojom se ovakva jedna platforma može povezati.

**Slika 19. Rubni uvjeti konstrukcije**

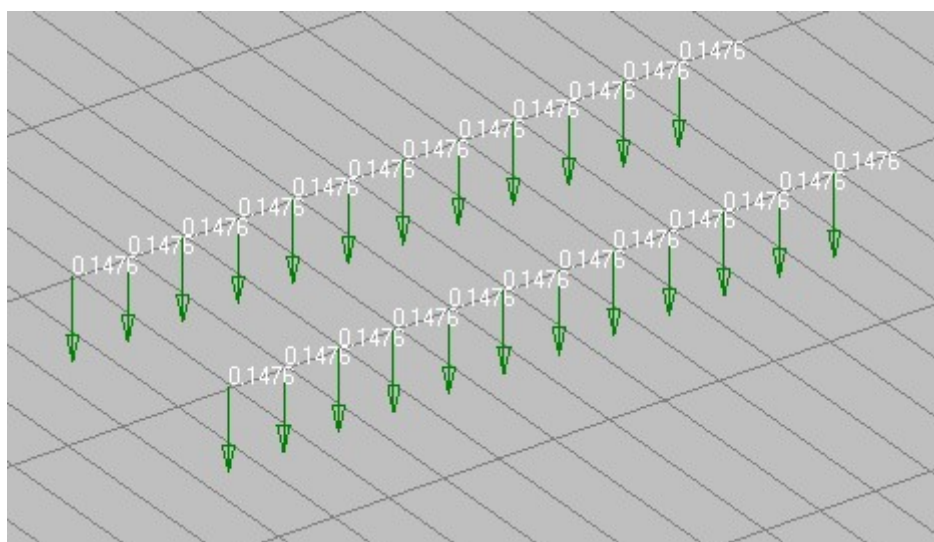
Opterećenja su zadana preko tlakova koji predstavljaju opterećenje od dva kotača jednog uobičajenog automobila. Tlakovi su postavljeni u sredini platforme, međusobno su udaljeni 2600 mm, a od prednjeg i zadnjeg ruba platforme 1700 mm (slika 20). Radi jednostavnije prezentacije rezultata, ovaj slučaj opterećenja u nastavku nosi kraticu LC.

**Slika 20. LC slučaj opterećenja**

Hrvatski Registar Brodova propisuje dimenzije otisaka kotača automobila, pa se u tu svrhu opterećenje pojedinog kotača raspodijelilo na 24 konačna elementa što u modelu čini otisak dimenzija 180x120 mm, a što je približno dimenzijama koje propisuje Registar.

NAME	LOAD AT	AXLE LOAD (t)	TYRE PRINT (mm)
PRIVATE CAR	SEA	$L=4.8\text{ m}$ $B=1.9\text{ m}$ 	

**Slika 21. Propisane dimenzije kotača osobnog automobila**



**Slika 22. Narinuti tlakovi**

Iznosi tlakova su se dobili sljedećim proračunom:

$$m_a = 1300 \text{ kg} - \text{masa automobila}$$

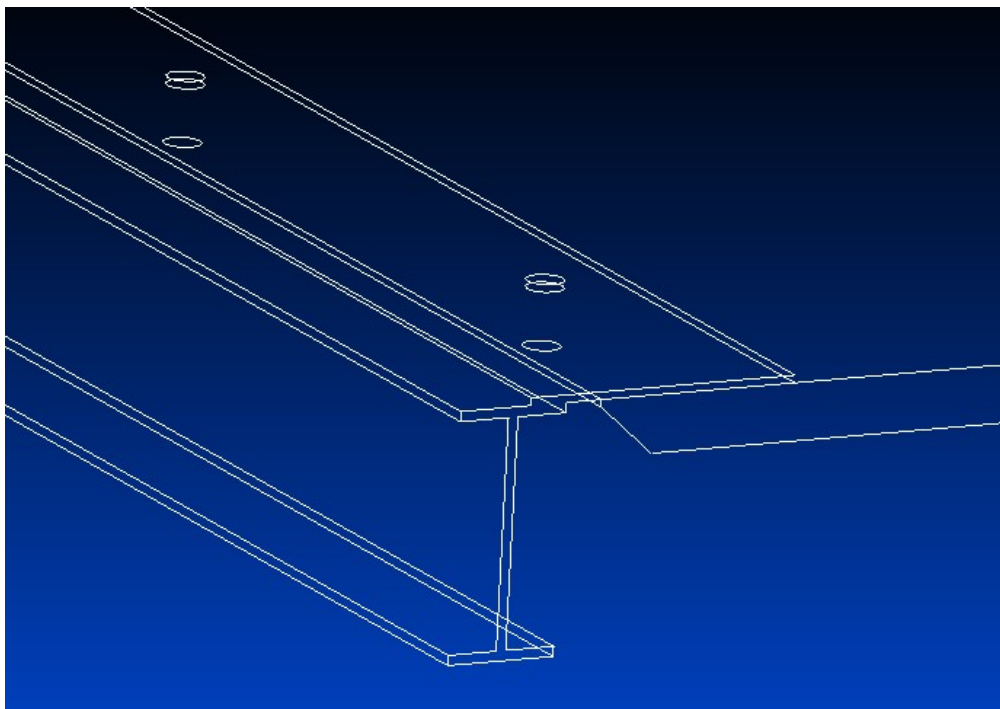
$$A = a \cdot b = 180 \cdot 120 = 21\,600 \text{ mm}^2 - \text{površina otiska kotača}$$

$$G_a = m_a \cdot g = 12\,753 \text{ N} - \text{težina automobila}$$

$$F_k = \frac{G_a}{4} = 3188.25 \text{ N} - \text{sila jednog kotača}$$

$$p_k = \frac{F_k}{A} = 0.1476 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} - \text{tlak od jednog kotača}$$

Zadavanje opterećenja i rubnih uvjeta predstavlja zadnji korak u procesu modeliranja. Ako su svi koraci u modeliranju ispravno napravljeni, model je spreman za analizu, u ovom slučaju linearno statičku. Prije provođenja same analize, poželjno je provjeriti slobodne rubove u FEMAP-u (*Free edges*) koji nam ukazuju na to koji dijelovi konstrukcije su spojeni u svojim čvorovima, a koji ne.



Slika 23. Linije slobodnih rubova modela

Kao što vidimo na slici 23, svaka rupa ima svoj „slobodan rub“ s gornje i donje strane te između kompozita i čelične pločice. To znači da između kompozita i čelične pločice ne postoji čvrsta veza koja se očituje u zajedničkim čvorovima susjednih elemenata. Takav slučaj smo i priželjkivali jer želimo promatrati kako će se konstrukcija ponašati kad je spojena samo s vijcima.

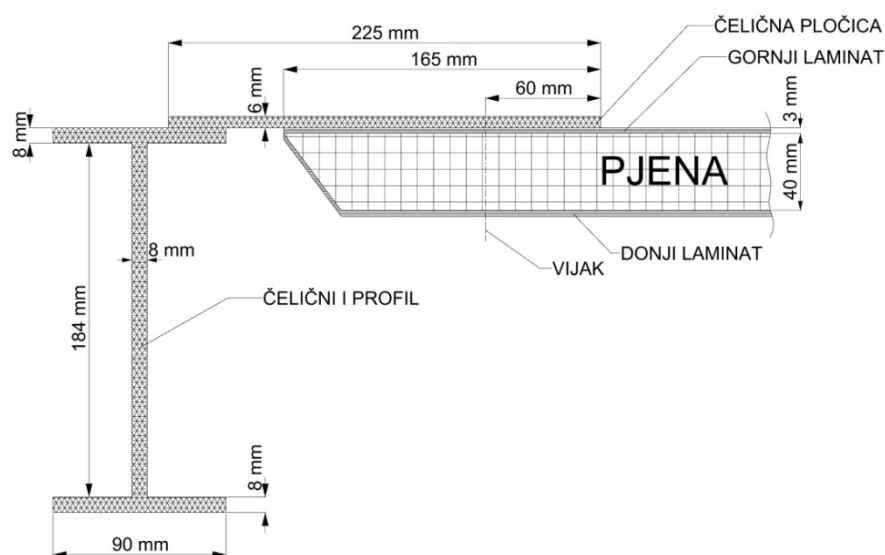
Nakon provjere slobodnih rubova, model je spreman za analizu.

### **4.3 Rezultati linearno statičke analize**

Linearno statička analiza dala nam je uvid u ponašanje konstrukcije za narinuto jednostavno opterećenje koje je karakteristično za ovakvu konstrukciju. Iz razloga što imamo vijčani spoj, pretpostavljalo se da će se najveća naprezanja pojaviti u blizini provrta, a najveći pomaci na mjestima djelovanja opterećenja od tlakova. Budući da su materijali u spoju stisnuti, a narinuti tlakovi koji predstavljaju kotače automobila opterećuju konstrukciju prema dolje, dobivena je velika koncentracija normalnih i smičnih naprezanja u neposrednoj blizini provrta. Međutim, zbog velike sprege naprezanja u svim smjerovima, kod promatranja stanja u pojedinim materijalima i uspoređivanja rezultata, predstavljene su ekstrapolirane vrijednosti Von Mises naprezanja iz FEMAP-a, a normalna i smična naprezanja su uzeta u obzir kod onih materijala kod kojih su ona uzrok narušavanja granične čvrstoće materijala. Bilo je upitno u kojoj mjeri će sila prednaprezanja vijka utjecati na materijale u spoju kad na konstrukciji nemamo radno opterećenje, pa se u tu svrhu promatrao i izolirani slučaj vijčanog opterećenja. Stoga su prezentirani rezultati za dva slučaja opterećenja: SPV (sila pritezanja vijaka) i LC (sila pritezanja vijaka + tlakovi)

U nastavku slijedi analiza rezultata za svaki model posebno, a na kraju će se oni usporediti s obzirom na sličnost izvedbe spoja.

## 1. Model 1:



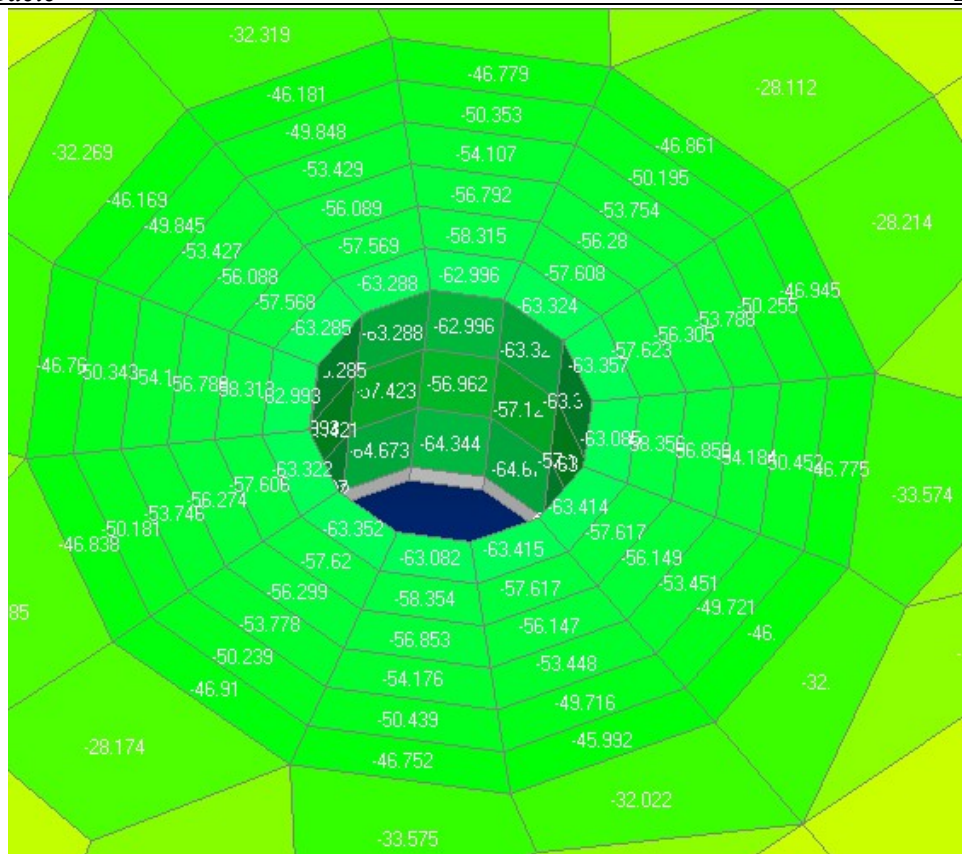
Slika 24. Model 1

Tablica 2. Ekstrapolirane vrijednosti Von Mises [ $\text{N/mm}^2$ ] naprezanja i vrijednosti maksimalnih pomaka [mm] za Model 1

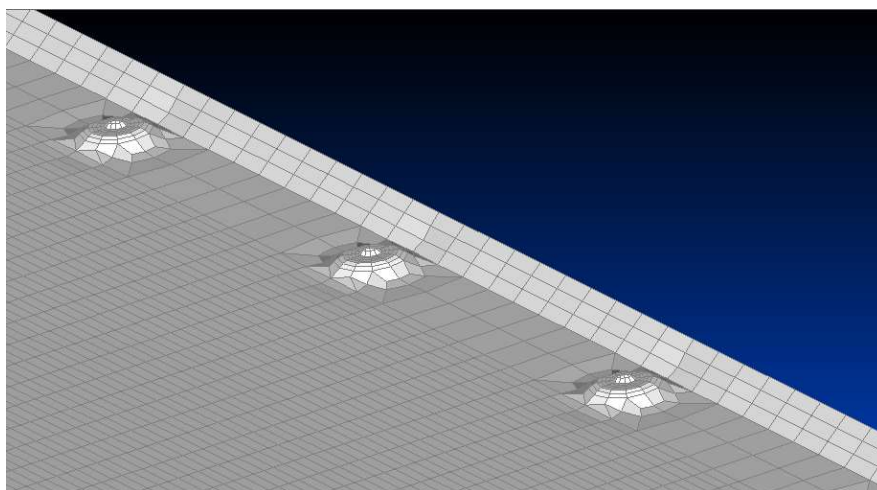
	Dopušteno			SPV	LC
Čelik	310.3			566.8	567.86
Gornji laminat	373.7	298.9	56.6	630	600
Donji laminat	373.7	298.9	56.6	600.21	550.4
Pjena	1.5	-0.9	1	53	53
Pomaci [mm]				16.78	16.7

Iz Tablice 2 možemo vidjeti da je granična čvrstoća narušena ne samo kod pjene i laminata, nego i kod čelika. Kod ove izvedbe najveći problem predstavlja prolazak vijka kroz pjenu kompozita. Dopušteno naprezanje pjene općenito je vrlo nisko, do  $5 \text{ N/mm}^2$ , pa je zbog toga poželjno da ona ne sudjeluje u spoju, već da vrši svoju funkciju povezivanja vlakana, jer je u protivnom gotovo sigurno da će doći do njenog oštećenja.





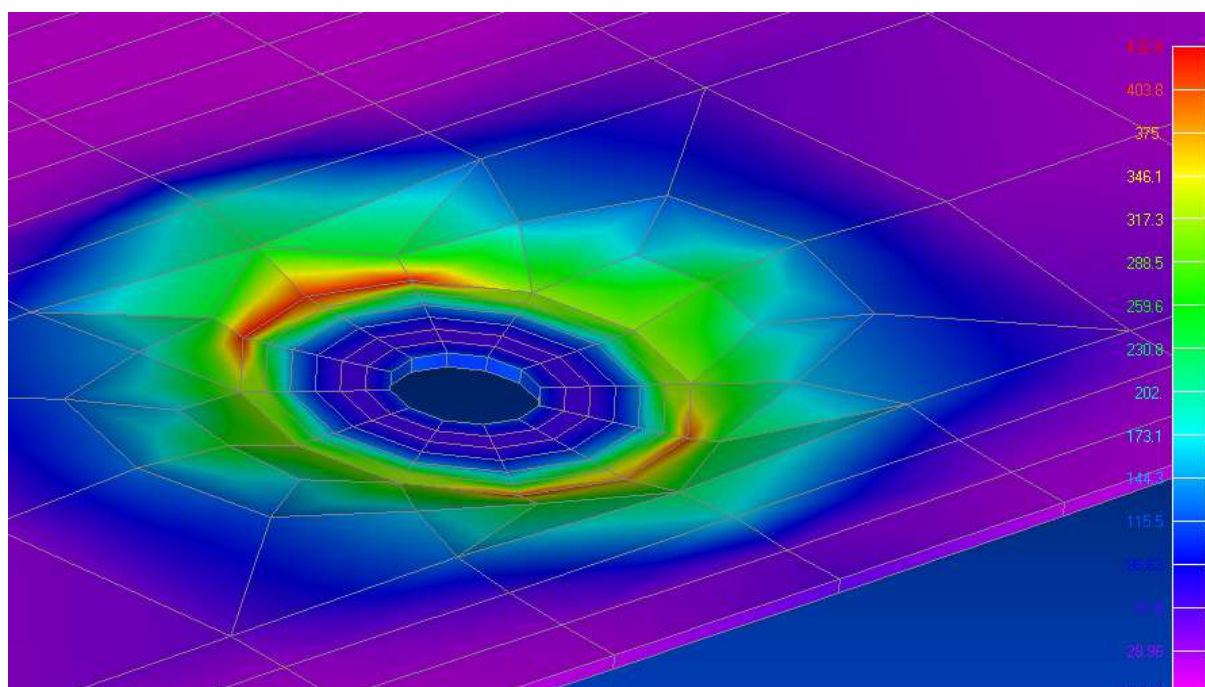
Slika 25. Model 1- Tlačna naprezanja u pjeni (SPV),  $\sigma_{\max}=64.673 \text{ N/mm}^2$



Slika 26. Model 1- Deformacija pjene (SPV),  $\delta_{\max}=16.72 \text{ mm}$



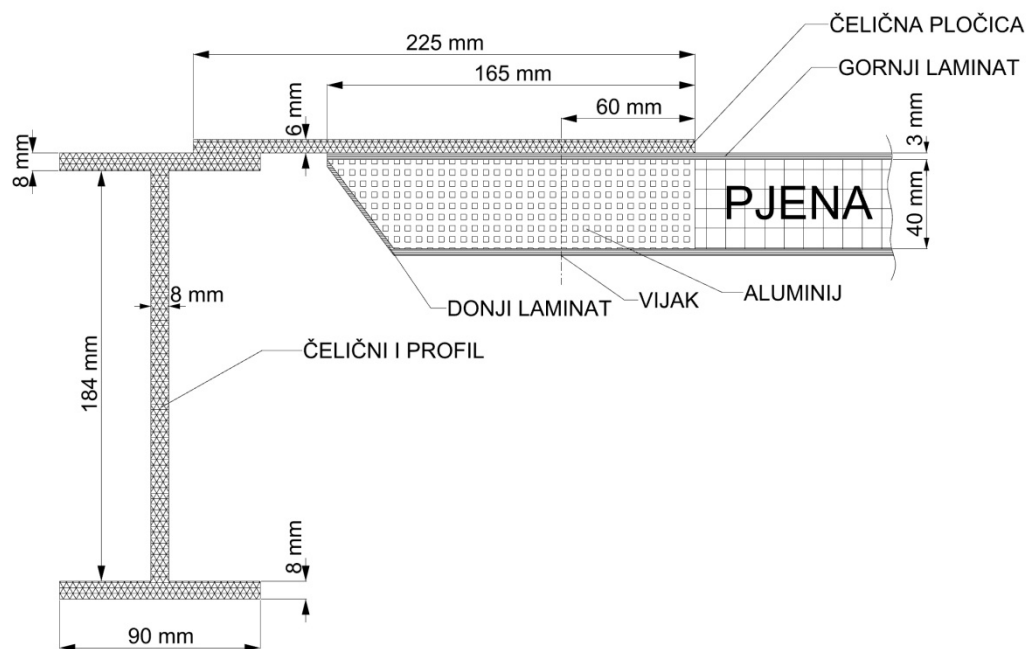
Na slici 25 vidimo da su naprezanja višestruko veća od onoga što pjena može podnijeti, a deformacije velike u tolikoj mjeri da uzrokuju ispupčenje sa strane. To nam može biti znak da je ovakva izvedba nepouzdana i da spoj može podbaciti. Zato što pjena nema dobra mehanička svojstva, ostatak konstrukcije u spoju je ugrožen pa lako može doći do oštećenja i u krajnjem slučaju kolapsa. Tako su na primjer u gornjem laminatu koji nije u direktnom doticaju sa vijkom, smična naprezanja višestruko premašila dopuštena smična naprezanja za staklena vlakna (slika 27).



**Slika 27. Model 1- Smična naprezanja u gornjem laminatu (LC),  $\sigma_{\max}=432.6 \text{ N/mm}^2$**

Iz tih razloga možemo zaključiti da je ovakva izvedba spoja loša i neupotrebljiva, te svakako treba izbjeći sudjelovanje pjene sendvič kompozita kao nosivog elementa konstrukcije.

## 2. Model 2



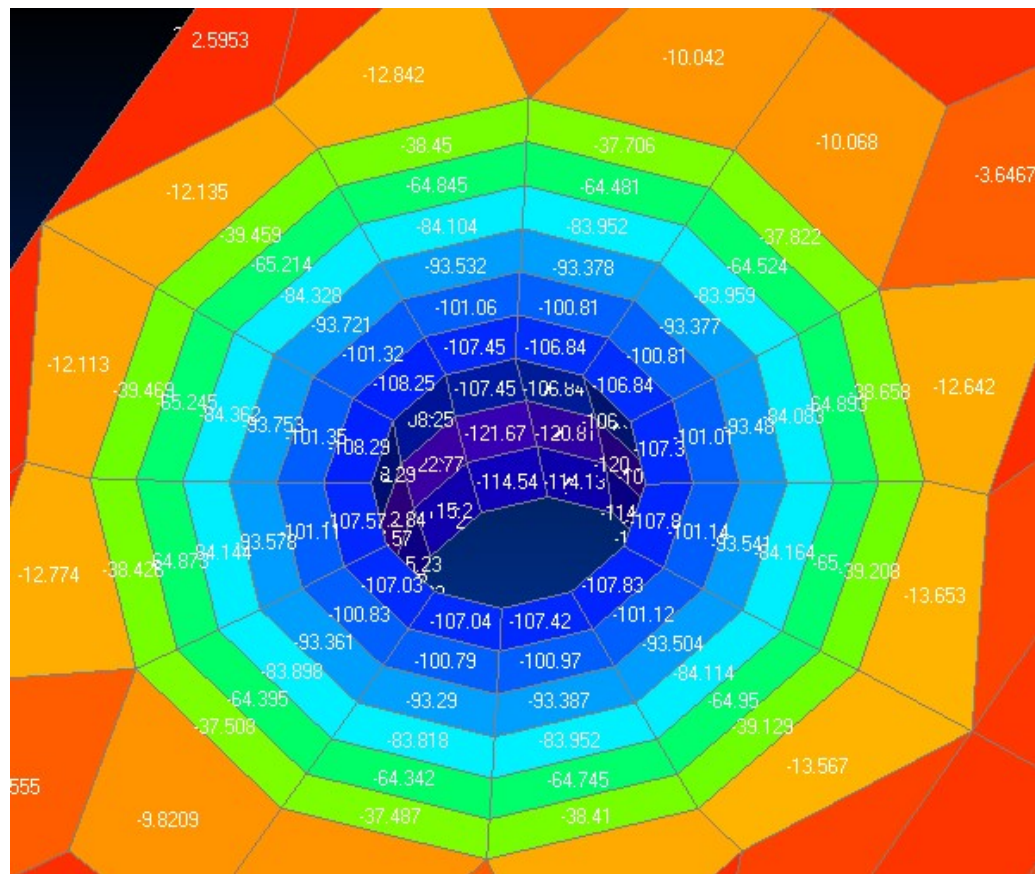
Slika 28. Model 2

Kod Model 2, umetnutom aluminijskom pločicom kao integriranim dijelom kompozita, u konstrukciju uvodimo materijal koji bi trebao adekvatno podnositi i u određenoj mjeri preuzeti vijčano tlačno opterećenje i pritom rasteretiti ostale materijale u spoju.

**Tablica 3. Ekstrapolirane vrijednosti Von Mises naprezanja  $[N/mm^2]$  i vrijednosti maksimalnih pomaka  $[mm]$  za Model 2**

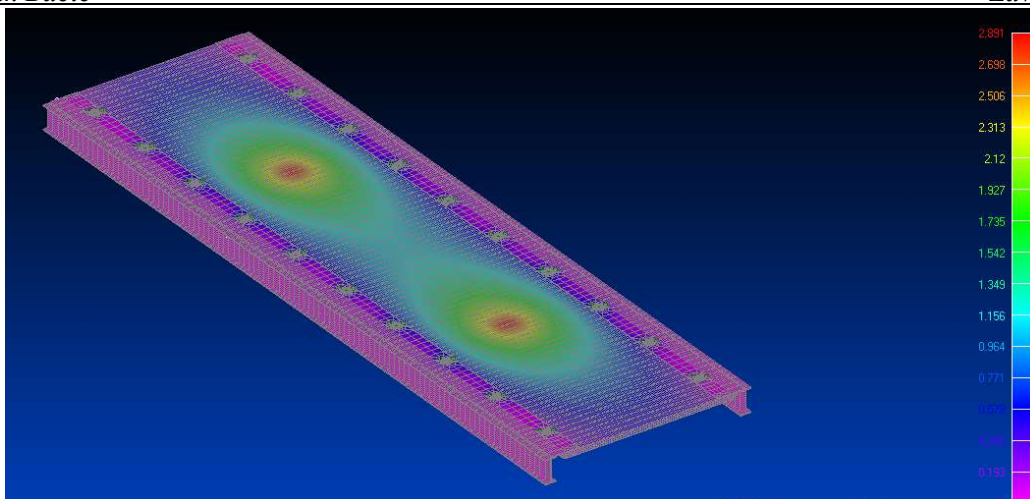
	dopušteno			SPV	LC
Čelik	310.3			189.65	190.3
Aluminij	96.5			111.13	111.38
Gornji laminat	373.7	298.9	56.6	72.9	72.88
Donji laminat	373.7	298.9	56.6	98.023	97.94
Pjena	1.5	-0.9	1	0	0.18
Pomaci $[mm]$				0.243	2.891

Iz Tablice 3 vidimo da su dobivena naprezanja za čelik i kompozit daleko ispod dopuštenih. Međutim, aluminijska pločica kao središnji element u spoju, u velikoj mjeri preuzima opterećenje od kompozita i čelika i time se premašuje granična čvrstoća aluminija. Najveći udio u sprezi imaju normalna tlačna naprezanja koja dostižu svoj maksimum u srednjem dijelu aluminijske pločice (slika 29).

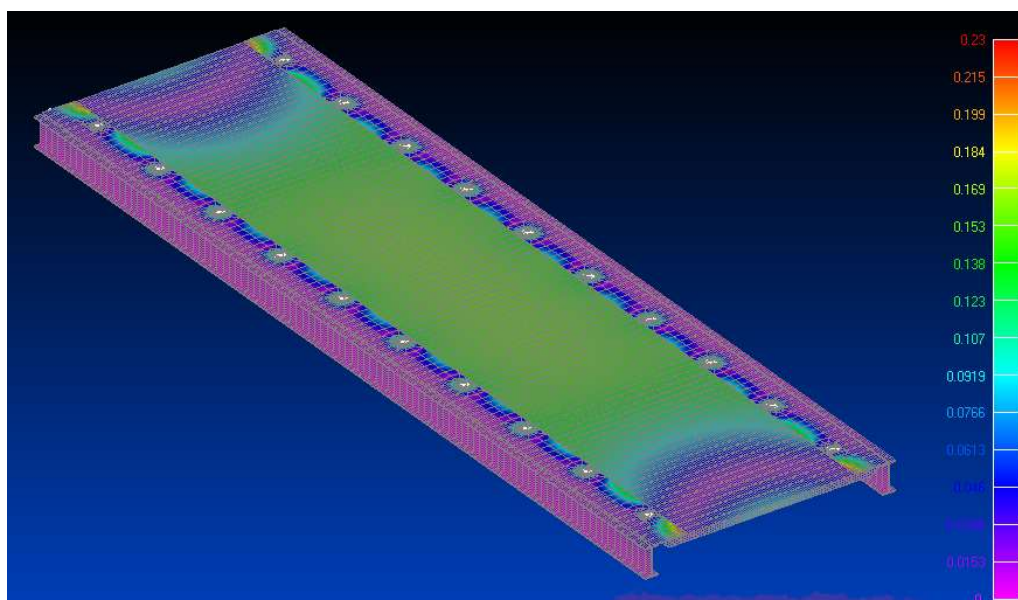


**Slika 29. Model 2- Tlačna naprezanja u aluminiju (LC),  $\sigma_{\max} = -121.67 \text{ N/mm}^2$**

Osim u neposrednoj blizini provrta, nigdje na konstrukciji nisu zabilježene koncentracije naprezanja. Stvarna deformacija platforme je jedva uočljiva i ponašanje materijala u spoju je jako dobro. Kao što smo i očekivali prije provedbe analize, kod LC slučaja opterećenja, najveći pomaci su dobiveni na mjestima djelovanja tlakova dok su za SPV slučaj opterećenja, najveći pomaci registrirani na krajevima čelične pločice, na strani kompozita (slika 29).



Slika 30. Model 2- Kontura deformacija za LC slučaj opterećenja,  $\delta_{\max}=2.89$  mm

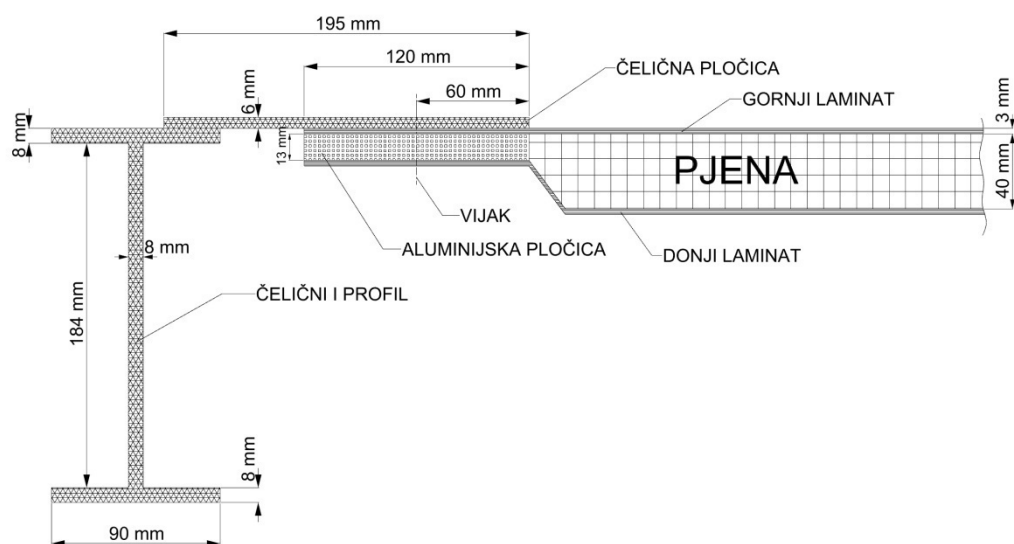


Slika 31. Model 2- Kontura deformacija za SPV slučaj opterećenja,  $\delta_{\max}=0.23$  mm

Vidimo da se čelična pločica u SPV opterećenju deformira valovito, a platforma se uzdužno prema sredini blago pregiba. Takvo ponašanje je i očekivano, budući da nema narinutog opterećenja koje bi spuštalo konstrukciju. Međutim, pošto su pomaci reda veličine desetine milimetra, možemo reći da deformacija platforme praktički i ne postoji.

Sve dosad spomenuto upućuje na pouzdanost dobivenih rezultata. Međutim, u tablici možemo primjetiti 16%-tnu razliku u vrijednostima naprezanja za gornji i donji laminat. Budući da su laminati sačinjeni od istog materijala, ta razlika bi ipak trebala biti nešto manja da bi mogli biti sigurni u pouzdanost analize. Iz tog razloga, opravdano je sumnjati u točnost rezultata, ali ćemo ih u svrhu usporedbe rezultata ipak prihvatiti kao točne.

### 3. Model 3:



### Slika 32. Model 3

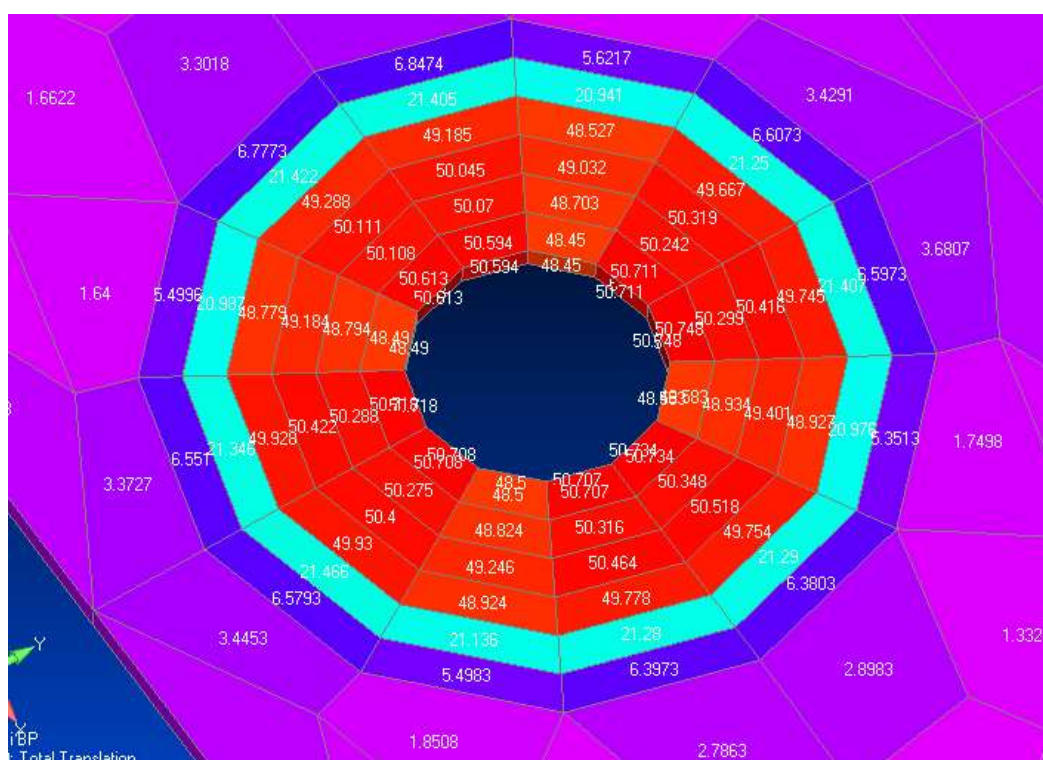
U ovom modelu se promatralo ponašanje konstrukcije sa 13 mm debelom aluminijskom pločicom umetnute između dva laminata u zoni spoja, te se gledalo kakav utjecaj će ta pločica imati na ostale materijale. Budući da se ona nalazi između dva laminata, očekuje se da će preuzeti najveći dio opterećenja u vijčanom spoju.





Zanimljivo je za uočiti veliku podudaranost u vrijednostima napreznja kod gornjeg i donjeg laminata te kod čelika i aluminija. To je naime i logično pošto su to dva para materijala sa istim/sličnim mehaničkim svojstvima.

Međutim, treba spomenuti da su smična napreznja u gornjem laminatu vrlo blizu dopuštene vrijednosti od  $56 \text{ N/mm}^2$ . Distribucija im je u neposrednoj blizini rupe gotovo jednoliko raspoređena, te im je veličina u prosjeku oko  $50 \text{ N/mm}^2$ . Izvan zone krutih elemenata, kao i kod aluminija, vrijednosti se naglo smanjuju (slika 34). Također, kako se ide u niže slojeve laminata, smična napreznja polako opadaju do vrijednosti od  $45 \text{ N/mm}^2$ .

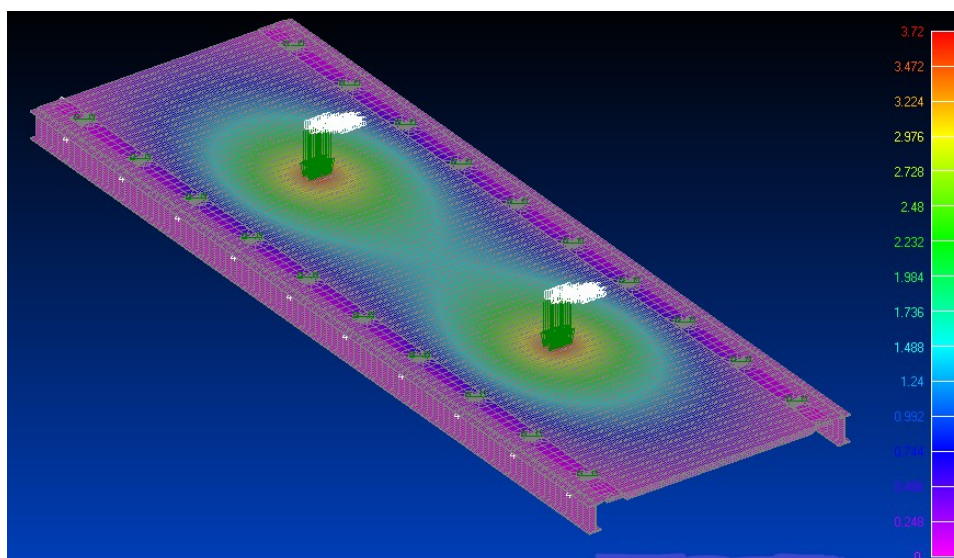


Slika 34. Model 3- Smična napreznja u gornjem laminatu (LC),  $\sigma_{\max}=50.708 \text{ N/mm}^2$

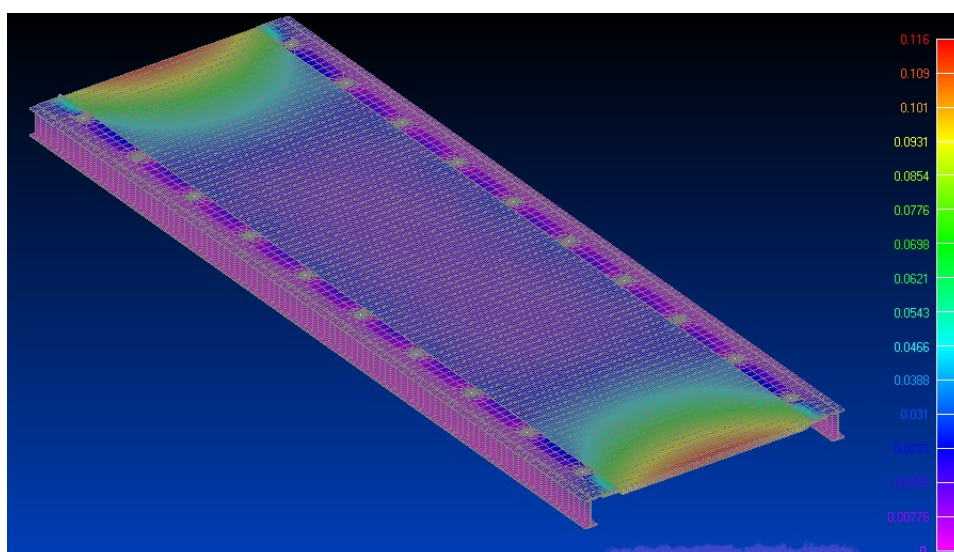
Kod donjeg laminata vrijednosti su u prosjeku nešto manje, oko  $48 \text{ N/mm}^2$ . Tu su još, osim smičnih napreznja, značajna normalna tlačna napreznja, ali su ona dovoljno niska da ne ugrožavaju čvrstoću materijala. Iako vrlo blizu, vrijednosti ipak nisu premašile graničnu smičnu čvrstoću staklenih vlakana, stoga možemo zaključiti da bi kompozit ipak izdržao ovakav spoj kod statičkog opterećenja. Međutim, ako bi konstrukcija bila podlegnuta uz ovakvo opterećenje i nekakvom dinamičkom opterećenju, pitanje je koliko dugo bi uspjela izdržati do prvih naznaka zamora.

S druge strane, čelik nije ugrožen od strane bilokakvih naprezanja, te u njegovoj sprezi, očekivano, prevladavaju normalne tlačna naprezanja, zbog vijčanog tlačnog opterećenja.

Osim u neposrednoj blizini provrta, nigdje na konstrukciji nisu zabilježene koncentracije naprezanja. Stvarna deformacija platforme je jedva uočljiva i ponašanje materijala u spoju je jako dobro. Kao što smo i očekivali prije provedbe analize, kod LC slučaja opterećenja, najveći pomaci su dobiveni na mjestima djelovanja tlakova, a kod SPV slučaja na uzdužnim krajevima platforme.



**Slika 35. Model 3- Kontura deformacija za LC slučaj opterećenja,  $\delta_{\max}=3.72$  mm**

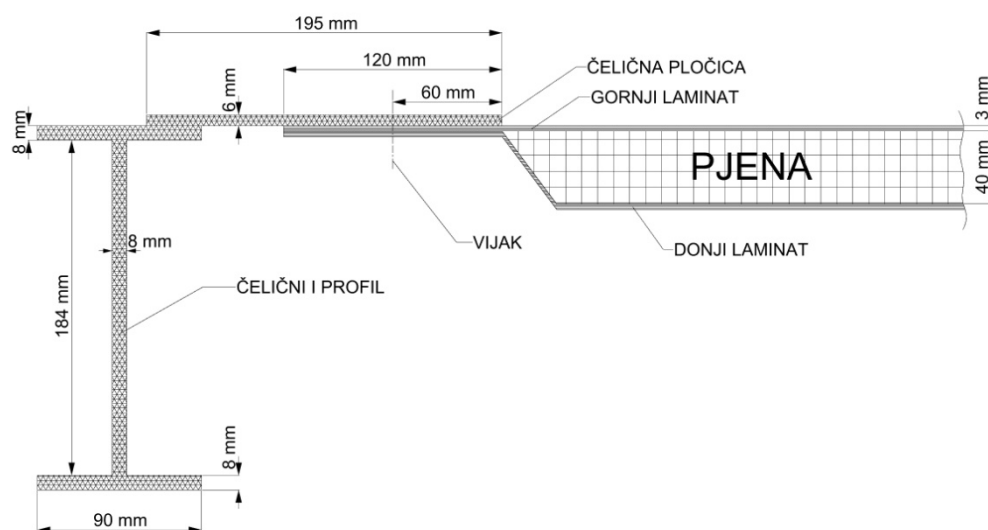


**Slika 36. Model 3- Kontura deformacija za SPV slučaj opterećenja,  $\delta_{\max}=0.116$  mm**



Teško je objasniti razlog zbog kojeg se za SPV maksimalni pomaci nalaze baš na tim mjestima. Budući da su oni reda veličine oko desetine milimetra, možemo reći da deformacija platforme praktički i ne postoji.

#### 4. Model 4:



Slika 37. Model 4

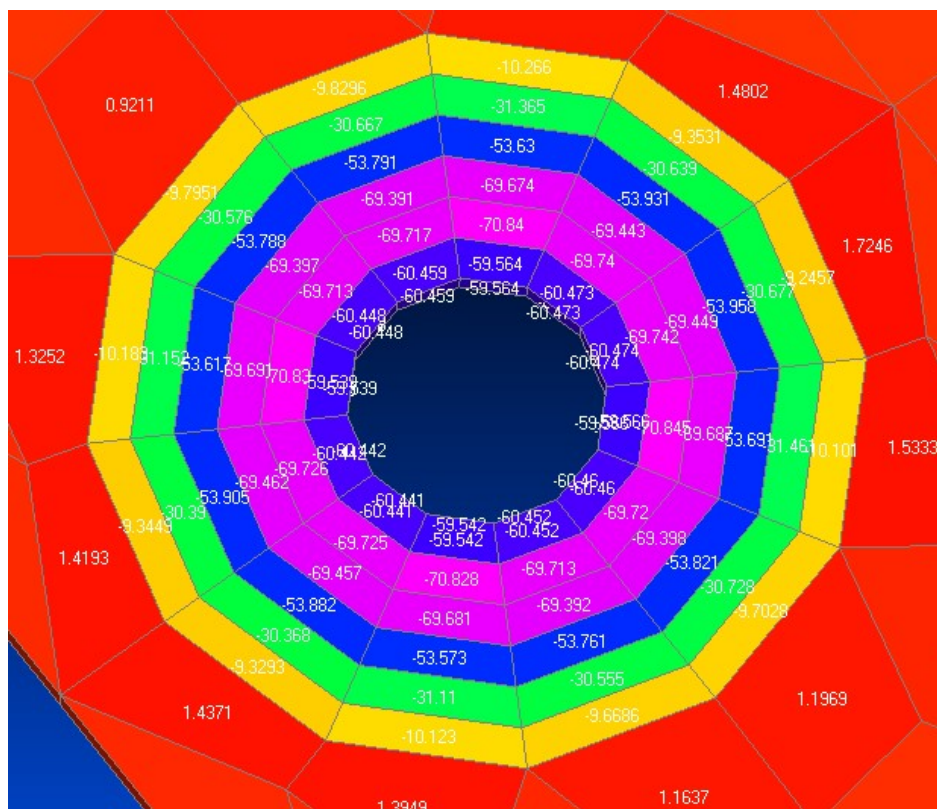
U zadnjoj, četvrtoj, imamo spoj čelične pločice sa laminatima kompozita, s pjenom izvan spoja.

**Tablica 5. Ekstrapolirane vrijednosti Von Mises naprezanja  $[N/mm^2]$  i vrijednosti maksimalnih pomaka  $[mm]$  za Model 4**

	dopušteno			SPV	LC
Čelik	310.3			146.41	149.25
Gornji laminat	373.7	298.9	56.6	107.8	107.93
Donji laminat	373.7	298.9	56.6	108.91	109
Pjena	1.5	-0.9	1	0.0026	0.175
Pomaci $[mm]$				0.06	3.967

U Tablici 5 vidimo vrijednosti naprezanja u materijalima koja, s obzirom na njihove dopuštene vrijednosti ukazuju na to da nijedan materijal nije ugrožen što se tiče čvrstoće. Međutim, ako

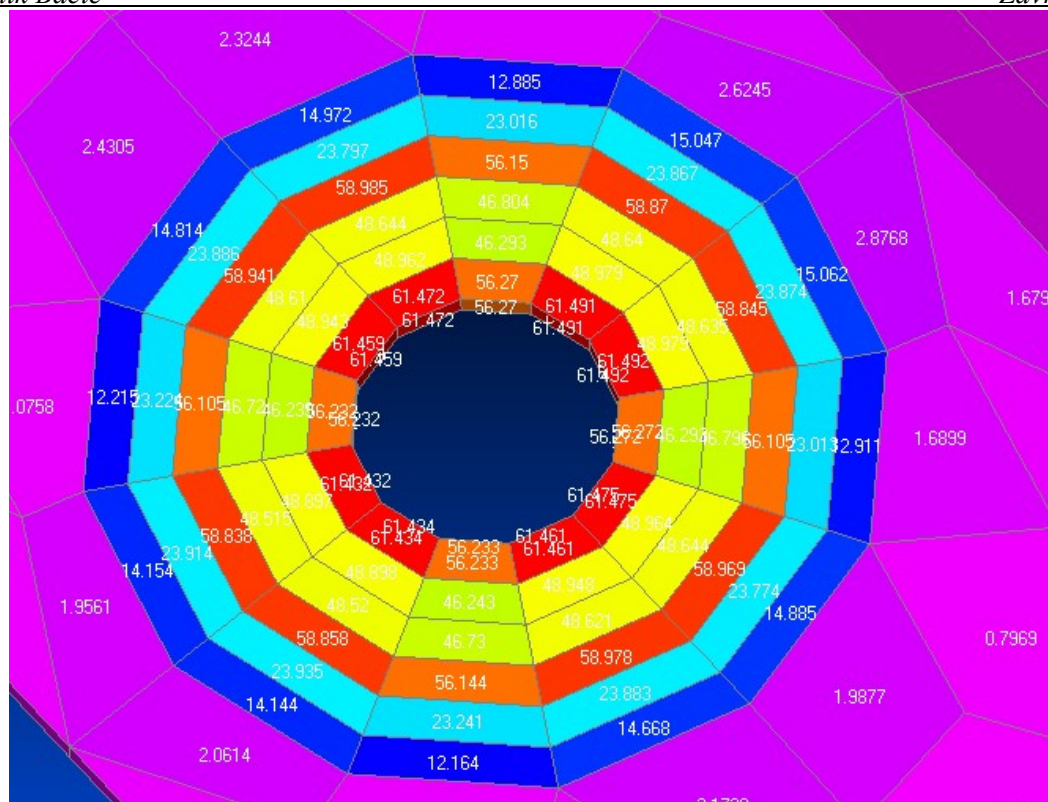
promotrimo smična naprezanja u gornjem laminatu, vidjet ćemo da ipak postoji opasnost od pojave pukotine. Smična čvrstoća staklenih vlakana E600-VIN iznosi  $56.6 \text{ N/mm}^2$ , a na slici 38 vidimo da su u gornjem laminatu vrijednosti tih naprezanja u prosjeku oko  $65 \text{ N/mm}^2$  s maksimumima na 5-15 mm od ruba provrta.



Slika 38. Model 4- Smična naprezanja u gornjem laminatu (LC),  $\sigma_{\max}=70.845 \text{ N/mm}^2$

Također, u velikoj mjeri su zastupljena i normalna tlačna naprezanja u gornjem laminatu, ali ona ne predstavljaju opasnost pošto ne prelaze vrijednost od  $130 \text{ N/mm}^2$ .

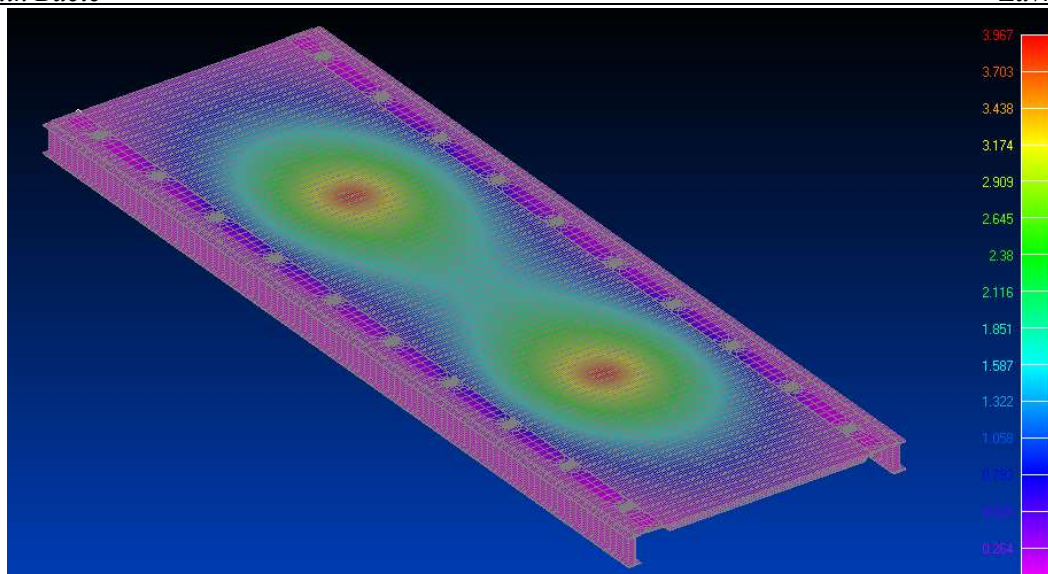
Kod donjeg laminata imamo slično ponašanje kao u gornjem, ali s manjom razinom i tlačnih i smičnih naprezanja. Moguć razlog tome bi bio taj što je gornji laminat jedini materijal koji se nalazi između čelika i donjeg laminata, pa je opterećen i s gornje i s donje strane. Međutim, smična naprezanja u donjem laminatu su prešla granicu dopuštenih naprezanja što znači da je i on u opasnosti od pojave pukotine (slika 39).



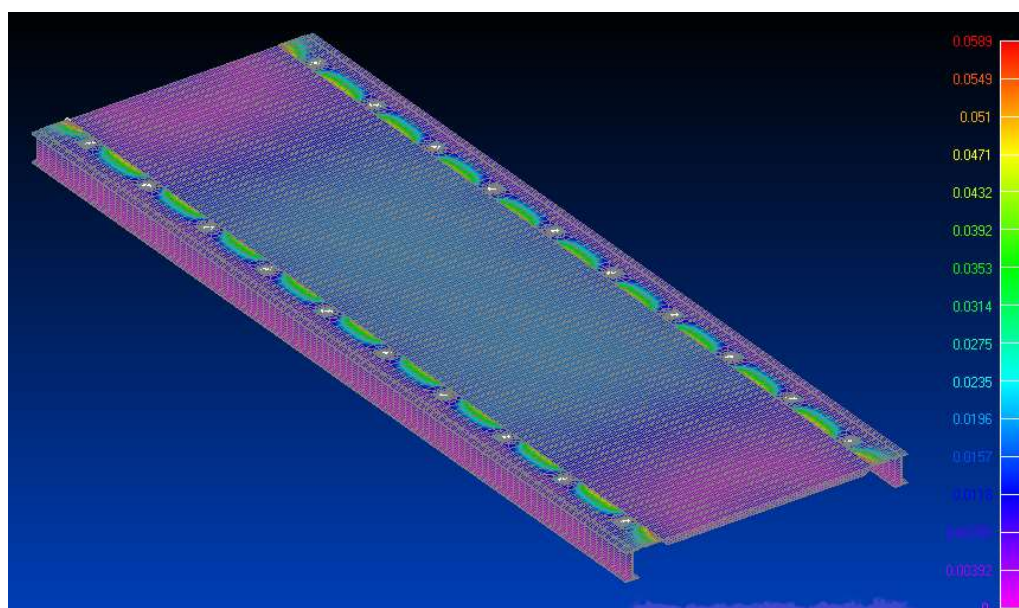
Slika 39. Model 4- Smična naprezanja u donjem laminatu (LC),  $\sigma_{\max}=70.845 \text{ N/mm}^2$

S druge strane, čelik nije u opasnosti od pojave oštećenja pošto su veličine svih vrsta naprezanja uvjerljivo ispod dopuštenih.

Osim u neposrednoj blizini provrta, nigdje na konstrukciji nisu zabilježene koncentracije naprezanja, stvarna deformacija platforme je jedva uočljiva. Kao što smo i očekivali prije provedbe analize, kod LC slučaja opterećenja, najveći pomaci su dobiveni na mjestima djelovanja tlakova, a kod SPV slučaja na krajevima čelične pločice, na strani kompozita. Međutim, pošto su pomaci reda veličine stotine milimetra, možemo reći da deformacija platforme praktički i ne postoji.



Slika 40. Model 4- Kontura deformacija za LC slučaj opterećenja,  $\delta_{\max}=3.967$  mm



Slika 41. Model 4- Kontura deformacija za SPV slučaj opterećenja,  $\delta_{\max}=0.0589$  mm

#### 4.4 Usporedba rezultata linearno statičke analize

##### 1) Usporedba Model 1-Model 2:

**Tablica 6. Vrijednosti ekstrapoliranih Von Mises naprezanja [N/mm<sup>2</sup>] i maksimalnih pomaka [mm] za Model 1 i Model 2**

	Model 1		Model 2	
	SPV	LC	SPV	LC
Čelik	566.8	567.86	189.65	190.3
Aluminij	/	/	111.13	111.38
Gornji laminat	630	600	72.9	72.88
Donji laminat	600.21	550.4	98.023	97.94
Pjena	53	53	0	0.18
Pomaci	16.78	16.7	0.243	2.891

Model 2 je u odnosu na Model 1 dao puno bolje rezultate. Implementacijom aluminija u konstrukciju vidimo da se vrijednosti naprezanja i pomaka višestruko smanjuju. Postojanje tvrdog i čvršćeg materijala u području spoja rezultira boljim ponašanjem konstrukcije i predstavlja sigurniji spoj. Osim što je analiza pokazala da je granična čvrstoća za aluminij u Modelu 2 premašena i da će vrlo vjerojatno doći do oštećenja materijala, rezultati nam pokazuju i da nikako nije na odmet umetanje dodatnog materijala u spoj u svrhu sigurnosti.

##### 2) Usporedba Model 2-Model 3:

**Tablica 7. Vrijednosti ekstrapoliranih Von Mises naprezanja [N/mm<sup>2</sup>] i maksimalnih pomaka [mm] za Model 2 i Model 3**

	Model 2		Model 3	
	SPV	LC	SPV	LC
Čelik	189.65	190.3	119.61	124.72
Aluminij	111.13	111.38	119.67	119.84
Gornji laminat	72.9	72.88	96.824	96.927
Donji laminat	98.023	97.94	97.172	97.082
Pjena	0	0.18	0.0086	0.185
Pomaci	0.243	2.891	0.116	3.72

U odnosu na Model 2, Model 3 ima 27 mm tanju aluminijsku pločicu. Iz tog razloga, prije same provedbe analize bilo je za očekivati da će naprezanja u aluminiju porasti, ali se nije moglo sa sigurnošću znati kako će to utjecati na ostale materijale u spoju. Iako je ponašanje konstrukcije u ova dva model identično, vidimo veliku razliku u napreznjima kod nekih materijala. Tako su se naprezanja smanjila kod čelika za otprilike 35%, u aluminiju povećala za 7%, a u gornjem laminatu za 25% dok su u donjem laminatu i pjenu ostala, možemo reći, ista. To znači da tanja aluminijska pločica ima najbolji utjecaj na čelik, a najgori utjecaj na samu sebe, pa smo tako i u Modelu 3 imali slučaj prekoračenja dopuštenog napreznja u aluminiju. Budući da u Modelu 3 imamo širu platformu u odnosu na Model 2, očekivalo se da će i pomaci biti veći budući da je narinuto isto opterećenje u obe konstrukcije. To se i ostvarilo, jer su u Modelu 3 pomaci veći za 13%.

### 3) Usporedba Model 3-Model 4:

**Tablica 8. Vrijednosti ekstrapoliranih Von Mises napreznja [ $\text{N/mm}^2$ ] i maksimalnih pomaka [mm] za Model 3 i Model 4**

	Model 3		Model 4	
	SPV	LC	SPV	LC
Čelik	119.61	124.72	146.41	149.25
Gornji laminat	96.824	96.927	107.8	107.93
Donji laminat	97.172	97.082	108.91	109
Pjena	0.0086	0.185	0.0026	0.175
Pomaci	0.116	3.72	0.06	3.967

U Modelu 4 izbačena je aluminijska pločica kao element spoja. Umjesto toga imamo spoj čelične pločice sa laminatima kompozita, s pjenu izvan spoja. U odnosu na Model 3, širina platforme je ista, stoga je bilo za očekivati slične vrijednosti u pomacima, budući da sad nemamo dodatan element u spoju koji bi u određenoj mjeri preuzeo opterećenje između čelika i kompozita, pretpostavljalo se da će naprezanja u tim materijalima porasti.

U Tablici vidimo da su naprezanja uistinu porasla u odnosu na Model 3 dok je deformacija platforme, možemo reći, ista. U čeliku su naprezanja veća za 13%, a u laminatima 10%. Jedan mogući razlog povećanja napreznja u gornjem laminatu bi bio taj što je to u ovom slučaju jedini materijal koji se nalazi između čelika i donjeg laminata. U oba ova modela smo imali problem povećanih smičnih napreznja u laminatima, s tim da su ona u Modelu 4 bila nešto veća nego u Modelu 3. To znači da za laminate veliku ulogu igraju materijali koji su u spoju, budući da pokazuju bolje stanje uz prisutnost

aluminija. S druge strane, čelik, kao ni u Modelu 2, nije u opasnosti od pojave oštećenja pošto su veličine svih vrsta naprezanja uvjerljivo ispod dopuštenih. Uostalom, povećanje naprezanja u Modelu 4 u odnosu na Model 3 nije veliko. To znači da za čelik nije previše bitno koji se materijal nalazi u spoju, dokle god taj materijal ima donekle dobra mehanička svojstva

Tablica 9 prikazuje ekstrapolirane vrijednosti *Von Mises* naprezanja očitanih u FEMAP-u kod svakog materijala, vrijednosti maksimalnih pomaka te ukupnu masu konstrukcije za svaku promatranu izvedbu spoja i to za oba slučaja opterećenja. Naprezanja su izražena u  $\text{N/mm}^2$ , pomaci u mm, a masa u kg.

**Tablica 9. Usporedba rezultata svih modela za oba slučaja opterećenja**

Materijal	Model 1		Model 2		Model 3		Model 4	
	SPV*	LC	SPV	LC	SPV	LC	SPV	LC
Čelik	566.8	567.86	189.65	190.3	119.61	124.72	146.41	149.25
Aluminij	/	/	111.13	111.38	119.67	119.84	/	/
Gornji laminat	355.33	350.7	72.9	72.88	96.824	96.927	107.8	107.93
Donji laminat	600.21	550.4	98.023	97.94	97.172	97.082	108.91	109
Pjena	53	53	0	0.18	0.0086	0.185	0.0026	0.175
Pomaci	16.78	16.7	0.243	2.891	0.116	3.72	0.06	3.967
Masa	972		972		874		820.8	

\*Slučaj opterećenja od sile pritezanja vijaka

Iz gornje tablice možemo zaključiti sljedeće:

- Sila prednaprezanja vijka ima velik utjecaj na materijale kroz koje vijci prolaze. Vrijednosti naprezanja su kod nekih modela praktički iste u oba slučaja opterećenja, a kod nekih se razlikuju za svega 4 % (Model 3, čelik).
- Najveća naprezanja javljaju se kod Modela 1 gdje vijak prolazi kroz pjenu kod koje su vrijednosti čak  $53 \text{ N/mm}^2$ . To nam je znak da je gotovo sigurno da će doći do pucanja materijala pošto je granična čvrstoća pjene vrlo niska. Također, naprezanja u čeliku prelaze graničnu čvrstoću čelika za više od  $200 \text{ N/mm}^2$ . Zbog toga možemo zaključiti da je ovakva izvedba spoja neprihvatljiva za praktične primjene.
- Najniža naprezanja se javljaju kod treće izvedbe gdje je aluminijska pločica stavljena između dva laminata. Međutim, i tu imamo problem prelaska granične čvrstoće, ali ovaj put kod aluminija. Naprezanja su veća za nešto više od  $20 \text{ N/mm}^2$  što također može rezultirati pojavom pukotine kod pritezanja vijka.
- Model 4 ima najmanju masu u odnosu na ostale modele.



## **5. ZAKLJUČAK**

S obzirom na kompleksnost hibridnih spojeva, istraživanja na tu temu iziskuju velik napor u pogledu načina na koji će se oni promatrati, izvesti i implementirati u konstrukciju. Ovaj rad je uvelike pojednostavljena verzija analize hibridnih spojeva. Izostavila su se razmatranja mnogih bitnih aspekata koji su neophodni za jednu konstrukcijsku analizu, kao npr- utjecaj slaganja vlakana u raznim smjerovima na mehanička svojstva kompozita, način izrade samog sendvič kompozita i moguće popratne pojave u istom, odabir odgovarajućih dimenzija konstruktivnih elemenata s obzirom na funkciju koju će obavljati itd. Također, kao što to inače biva u inženjerskim istraživanjima, poželjno je provesti, uz na primjer FEM analizu, i eksperimentalnu analizu s kojom bi se u velikoj mjeri dobio bolji uvid u promatrani problem. U ovom radu se provodila samo linearno statička analiza u odgovarajućem FEM softverskom paketu, za kompozitnu platformu proizvoljno uzetih dimenzija, ali uzetih po uzoru na (7) i dobiveni rezultati su uglavnom potvrdili očekivano ponašanje konstrukcije. Za karakteristično projektno opterećenje za takvu platformu rezultati su nam dali uvid u slabe točke vijčanog hibridnog spoja. U svim promatranim izvedbama spoja, uglavnom su podbacivali oni elementi u spoju koji su bili u sendviču, između čelične pločice i donjeg laminata kompozita. Ostatak konstrukcije, koji nije direktno sudjelovao u spoju, nije pokazivao znakove mogućih problema. Za bolji uvid u ponašanje ovakve ili slične konstrukcije, definitivno bi trebalo provesti i eksperimentalnu analizu.



**LITERATURA**

1. **Jean Paul Kabche, Vincent Caccese , Keith A. Berube & Lawrence Thompson.** *Analysis of a hybrid composite/metal ship hull structural system with removable panels.* s.l. : Ships and Offshore Structures, 2007.
2. **D.P. Graham, A. Rezai, D. Baker, P.A.Smith, J.F.Watts.** *The development and scalability of a high strength, damage tolerant, hybrid joining scheme for composite-metal structures.*
3. **ANALYSIS OF HYBRID (BOLTED/BONDED) STEEL-TO-COMPOSITE JOINT FOR MARINE APPLICATION.**  
**P. Yarza, G. Risso, E. Tomaso.** Seville : an., 2014.
4. **Anon.** *Guide to the Structural Use of Adhesives.* s.l. : The Institution of Structural Engineers, 1999.
5. **S. W. Boyd, J. I. R. Blake, R. A. Sheno and A. Kapadia.** *Strength and Durability of Steel to Composite Joints for Marine Application.* Southampton : University of Southampton, 2006.
6. **Xiao-Wen Li, Ping Li, Zhuang Lin and Dong-Mei Yang.** *Analysis and Optimization of Composite to Steel Joints for Ships.* Harbin, China : IFSA Publishing, 2014.
7. *Structural design and analysis of an innovative car carrier.* **Jerolim Andrić, Stanislav Kitarović, Vito Radolović, Pero Prebeg.** Gothenburg, Sweden : International Conference on Ships and Offshore Structures, 2018.
8. *Nacrt Hrvatske Norme. Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija - Dio 1-8: Proračun priključaka-Nacionalni dodatak.* Zagreb : Hrvatski zavod za norme, 2013.

## **PRILOZI**

- I. Modifikacije u konstrukciji i mreži konačnih elemenata kod Modela 3

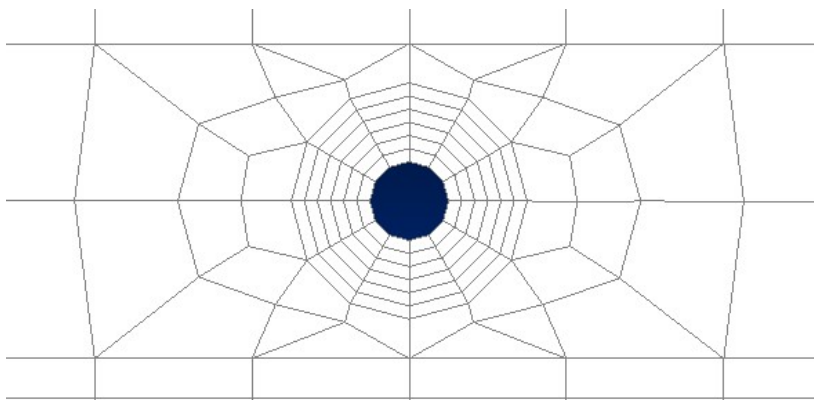
## **PRILOG 1**

Modifikacije u konstrukciji i mreži konačnih elemenata kod Modela 3

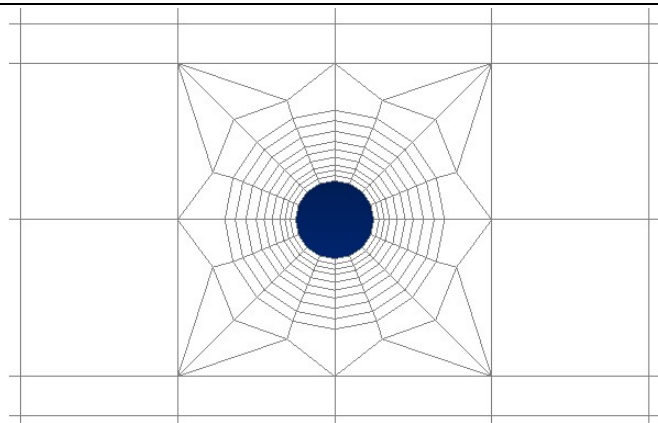
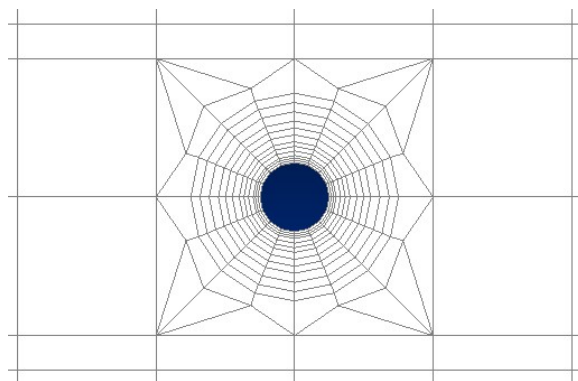
U ovom radu se također promatrao utjecaj mreže k.e. na rezultate linearno statičke analize. Radi jednostavnosti i uštede vremena, ovaj test se radio samo na Modelu 3. Gledalo se u kojoj mjeri će se razlikovati veličine najvećih naprezanja kod pojedinih materijala ako mrežu konačnih elemenata napravimo finijom u neposrednoj blizini rupe. Napravljene su još dvije mreže, jedna gušća od druge. Uz to se promatralo i na koji način će se promijeniti ponašanje konstrukcije ako se broj provrta za vijke smanji sa ukupnih 20, koliko je bilo na početku, na ukupnih 10. Dimenzije konstrukcije i vrijednosti opterećenja ostale su nepromijenjene.

Budući da su kod ovog modela najproblematičniji dijelovi konstrukcije bili aluminijska pločica i laminati kompozita, prikazat će se stanje i ponašanje tih materijala. Kako su se dobile gotovo iste vrijednosti za gornji i donji laminat kompozita, ista analogija u promjenama rezultata je dobivena i kod donjeg laminata. Iz tog razloga, prezentirat će se rezultati samo od gornjeg laminata.

Sljedeće slike prikazuju početnu mrežu k.e. u neposrednoj blizini provrta, te dvije finije mreže.



**Slika1. Mreža 1**

**Slika 2. Mreža 2****Slika 3. Mreža 3**

Na slikama vidimo da su elementi u novim mrežama manji i brojniji što se više približavamo provrtu. Uz to se smanjuju i elementi u široj okolini rupe pa mreža izgleda nešto bolje. Model s reduciranim brojem provrta ima prvu finiju mrežu.

Rezultati analize:

Rezultati analize kod modela finijih mreža pokazala su nešto drugačije vrijednosti naprezanja i deformacija u odnosu na prvotni model. Najveća odstupanja su se dobila kod modela s drugom finijom mrežom koja je pokazala općenito manje vrijednosti u odnosu na ostale modele. Najbolje podudaranje se dobilo kod modela s prvom finijom mrežom, dok je model s reduciranim brojem provrta dao veća naprezanja i pomake, ali gotovo 50% lakšu konstrukciju. Velika podudaranost se dobila u deformaciji konstrukcije. Svi modeli su pokazali isto ponašanje pod narinutim opterećenjem, s jedinom razlikom u vrijednostima maksimalnih pomaka, koji su i dalje na istim mjestima. Sljedeće tablice uspoređuju dobivene rezultate.

Aluminijska pločica:**Tablica 1. Ekstrapolirana tlačna naprezanja iz FEMAP-a u aluminiju i maksimalni pomaci**

Mreža 1		Mreža 2		Mreža 3		Model 5	
SPV	LC	SPV	LC	SPV	LC	SPV	LC
-134.87	-134.89	-140.89	-140.91	-118.26	-118.09	-141	-140.98

Gornji laminat:**Tablica 2. Ekstrapolirana smična naprezanja iz FEMAP-a u gornjem laminatu**

Mreža 1		Mreža 2		Mreža 3		Model 5	
SPV	LC	SPV	LC	SPV	LC	SPV	LC
50.532	50.613	53.84	54.36	44.8	44.8	54.34	54.4

**Tablica 3. Usporedba rezultata Von Mises naprezanja za modifikacije kod Modela 3**

	Prvotna mreža		Prva finija mreža		Druga finija mreža		Manji broj provrta	
	BP	LC	BP	LC	BP	LC	BP	LC
Čelik	119.61	124.72	131.64	137.1	116.46	116.63	130.24	142.16
Aluminij	119.67	119.84	128.63	128.81	105.53	105.52	128.88	128.87
Gornji laminat	96.824	96.927	102.81	103.35	84.9	85	103.32	104.12
Donji laminat	97.172	97.082	103.25	103.15	85.378	85.29	103.33	103
Pjena	0.0086	0.185	0.008	0.1872	0.009	0.552	0	0.187
Pomaci [mm]	0.116	3.72	0.122	3.732	0.112	2.064	0.0981	4.123
Masa [kg]	874		874		874		472	

Iz gornje tablice možemo zaključiti sljedeće:

- U odnosu na prvotnu mrežu, prva finija mreža je dala veća naprezanja za prosječno 7%, dok su kod druge finije mreže vrijednosti u prosjeku manje za oko 12%. Najveća razlika se javlja kod druge finije mreže u donjem laminatu gdje je naprezanje 13.8% manje.
- Kod modela s reduciranim brojem provrta, gdje je mreža k.e. prva finija, vrijednosti naprezanja se dobro poklapaju s onim gdje imamo duplo više provrta, a masa konstrukcije se višestruko smanjila. Stoga, možemo zaključiti da je ovakva izvedba konstrukcije pogodnija. Međutim, do koje mjere se broj provrta može smanjiti iziskuje detaljniju analizu i optimizaciju.
- Možemo primijetiti da je kod aluminija i dalje premašena granična čvrstoća zbog čega može doći do pojave pukotine. Stoga, jedini način rješavanja tog problema bi bio izvedba spoja sa čvršćim i tvrdim materijalom.